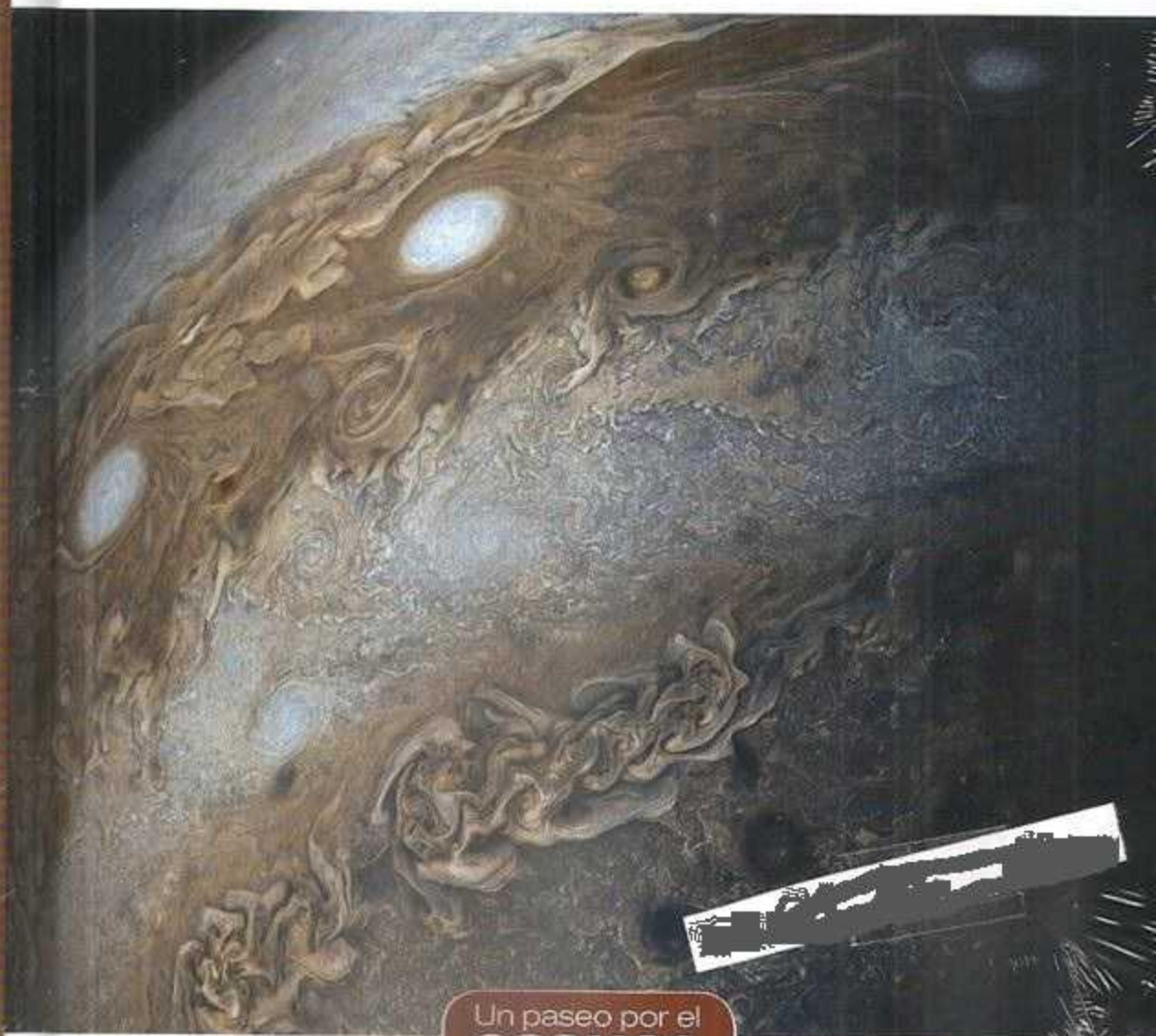


Climatología planetaria

Los otros climas
del sistema solar



Un paseo por el
COSMOS

Climatología planetaria

Los otros climas
del sistema solar

RBA

Imagen de cubierta: Representación en falso color del manto de nubes de Júpiter creada a partir de los datos de la sonda de la NASA Juno en mayo de 2017.

A mi familia. A Elisa

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Antonio M. Moro Muñoz por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock: 139a, 147a; Archivo RBA: 111a; Calvin J. Hamilton: 64; European Space Agency & Max-Planck Institute for Solar System Research: 59bd; ESA/NASA/JPL/University of Arizona: 117; Glen Fergus: 67b; J. Comas Solá, «Observationes des Satellites Principaux de Jupiter et de Titan», *Astronomische Nachrichten*, 179(4290). p289-290. (1908): 111bi; Matthewjparker: 147b; NASA: 51, 94, 100, 111bd, 125b, 139b; NASA, ESA, and A. Simon (Goddard Space Flight Center): 81a; NASA/Jet Propulsion Lab- <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00379>: 125a; NASA/JPL: 101; NASA/JPL - <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00716>: 127ad; NASA/JPL-Caltech: Portada, 69b, 127bd; NASA/JPL-Caltech/MSSS: 69a; NASA/JPL-Caltech/SETI Institute: 127ai; NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute: 93; NASA/JPL/Corby Waste: 65; NASA/JPL/Space Science Institute: 127bi; NASA/JPL/Texas A&M/Cornell: 67a; NASA/Viking 1: 59bi; Soviet Planetary Exploration Program, NSSDC: 59a

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-9086-1
Depósito legal: B 22063-2017

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)
Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Un punto azul pálido 13
CAPÍTULO 2	Los planetas interiores 43
CAPÍTULO 3	Los planetas gigantes 73
CAPÍTULO 4	El clima de las lunas 103
CAPÍTULO 5	El clima del pasado y del futuro 131
LECTURAS RECOMENDADAS	153
ÍNDICE	155

INTRODUCCIÓN

El 22 de febrero de 2017 la NASA anunciaba en una rueda de prensa uno sus descubrimientos recientes más fascinantes; la existencia de un sistema solar situado a «apenas» 40 años-luz de la Tierra que contendría nada menos que siete planetas de un tamaño similar al nuestro. Tres de ellos estarían situados en la llamada *zona de habitabilidad*, la región en torno a una estrella en la cual un planeta puede albergar agua en estado líquido en su superficie. La noticia, amplificada por los medios de comunicación, desató rápidamente la curiosidad y el interés del público en general ante la posibilidad de que alguno de estos planetas pudiera reunir condiciones propicias para la existencia de vida. La estrella en cuestión, bautizada con el nombre de TRAPPIST-1, es por lo demás bastante común, del tipo conocido como enana roja, de pequeño tamaño y muy fría, una más entre millones y millones de estrellas de nuestra galaxia. De no ser por este descubrimiento, habría pasado inadvertida para la comunidad científica y no hubiera ni salido en los periódicos.

Aunque el descubrimiento del sistema planetario de TRAPPIST-1 ha tenido mayor repercusión que otros por su relativa cercanía y su número de planetas, con anterioridad a este se

habían encontrado más de 3400 exoplanetas (es decir, planetas externos a nuestro sistema solar) y, de hecho, la cifra ha seguido creciendo. El 1 de julio de 2017, el catálogo de la NASA recogía casi 3500 exoplanetas, de los cuales 362 corresponden a planetas de un tamaño comparable al nuestro. Cuando el lector esté leyendo estas páginas, es más que probable que estos números hayan aumentado notablemente.

Aunque no podemos descartar que la vida pueda darse en condiciones muy diferentes a las de nuestro planeta, nuestra experiencia nos dice que en aquellos entornos donde hay agua, accesos a elementos biogénicos (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno) y una fuente de energía, es más fácil encontrar vida. Es por eso que los científicos intentan identificar entre los exoplanetas aquellos que reúnan condiciones lo más parecidas a las nuestras. Para ello, no basta con conocer su tamaño. Por ejemplo, Venus y Marte tienen tamaños no muy diferentes al de la Tierra y ninguno de ellos posee agua líquida en su superficie. ¿Cómo saber, por tanto, si los exoplanetas identificados reúnen las condiciones climáticas adecuadas? Estas preguntas empiezan a hallar respuesta gracias a los enormes avances en las técnicas empleadas para el estudio de exoplanetas, pero todavía no podemos hacernos una idea detallada acerca del clima y los fenómenos meteorológicos. Hay que tener en cuenta que la gran mayoría de los exoplanetas se conocen de forma indirecta, a partir de la perturbación que producen sobre el movimiento de la estrella en torno a la que orbitan, o bien debido a la pequeña atenuación de su brillo cuando se interponen entre esta y la Tierra. Apenas unos pocos se han podido observar directamente con el telescopio pero, incluso en estos casos, las imágenes no muestran más que un punto luminoso.

La situación recuerda a la que existía en relación a nuestro propio sistema solar antes de la invención del telescopio. Hasta entonces, los únicos planetas conocidos, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, no pasaban de ser pequeños puntos luminosos que se movían lentamente sobre el fondo estrellado (una reminiscencia de aquella época es el significado del nombre «planeta» que, traducido del griego, significa justamente «errante»).

El 7 de junio de 1610 representa un antes y un después en nuestro conocimiento y concepción del universo. Esa noche, Galileo apuntó su telescopio hacia Júpiter y realizó un descubrimiento sorprendente. Tres pequeñas «estrellas» alineadas acompañaban al planeta. Unos días más tarde, descubrió una cuarta «estrellita», alineada también con las otras tres. Había descubierto que Júpiter, como la Tierra, posee lunas orbitando en torno a él. La Tierra dejaba de ser el centro de todos los astros del universo. Lo emocionante de este descubrimiento es comparable al hallazgo de los primeros planetas extrasolares aunque, en este último caso, sabemos de antemano que estos exoplanetas deben ser objetos muy frecuentes, mientras que para Galileo debió ser una auténtica conmoción encontrarse con la pequeña cohorte de satélites jovianos.

Tras las pioneras observaciones de Galileo, muchos otros astrónomos tomaron el relevo y, usando telescopios cada vez más potentes, fueron descubriendo el resto de planetas del sistema solar (Urano, Neptuno, Plutón) así como numerosas lunas, la mayoría orbitando en torno a Júpiter y Saturno. Pero, incluso entrados en el siglo xx, no se tenía apenas idea de sus condiciones climáticas, más allá de conjeturas basadas en una interpretación, a veces errónea, de las imágenes de telescopio. Fue a finales del siglo xix cuando el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli descubrió los populares «canales» de la superficie de Marte. El hallazgo desató la imaginación de muchas personas que quisieron ver en estos canales complejas obras de ingeniería construidas por una avanzada civilización para transportar el agua de unas partes a otras del planeta. En el caso de Venus, la situación era más enigmática, ya que ni los más potentes telescopios permitían apreciar ningún detalle de su superficie, oculta tras una espesa masa nubosa. Pero esto no fue obstáculo para que, hasta mediados de la década de 1960, muchos albergaran la esperanza de que, tras dichas nubes, se ocultara un selvático paisaje, con abundante agua e incluso una atmósfera respirable.

La primera fuente de conocimiento del clima de los planetas de nuestro sistema solar llegó gracias al descubrimiento de la radiación infrarroja, realizado por el músico y astrónomo germano-

británico William Herschel en el año 1800. Herschel comprobó que esta misteriosa radiación formaba parte de los rayos solares y que, a pesar de ser invisible, era capaz de elevar la temperatura de un termómetro, de ahí que se refirió a ella como «rayos caloríficos». Hoy sabemos que los rayos infrarrojos son ondas electromagnéticas, de la misma naturaleza que la luz visible, pero de una frecuencia menor que la de la radiación roja. Poco después, se descubrió que existía una relación entre la radiación que emite un objeto y su temperatura y que, para un planeta o luna, la mayor parte de la radiación emitida corresponde precisamente a la zona del infrarrojo. Esto permitió estimar la temperatura de la Luna y los planetas, antes incluso de que estos fueran visitados por los ingenios espaciales, mediante el análisis de su radiación infrarroja.

Cuando se aplicó esta técnica a Mercurio, las medidas indicaron una temperatura diurna por encima de los 300 °C, consecuencia de su proximidad al Sol, pero que durante la noche se desploma hasta los 173 °C bajo cero. Estas variaciones extremas entre el día y la noche que, como veremos, son consecuencia de la ausencia de atmósfera, ocurren también en nuestra propia Luna. Sin embargo, al estar más lejos del Sol, las temperaturas diurnas no llegan a ser tan elevadas.

En el caso de Marte, las medidas realizadas a mediados de la década de 1940 sugerían que este era un lugar muy frío, pero no se descartaba que pudiera albergar algún tipo de vegetación similar a la que se encuentra en las regiones más frías de la Tierra. Esta idea quedó descartada con las imágenes de su superficie enviadas por la sonda Mariner 4 en 1965, que nos descubrieron un paisaje árido y seco, sin ningún vestigio de vegetación o de agua, y con una atmósfera 100 veces más ligera que la nuestra, compuesta por dióxido de carbono.

En cuanto a Venus, la densa capa de nubes que cubre permanentemente el planeta suponía una dificultad añadida a la hora de determinar su temperatura. La radiación infrarroja emitida por el planeta procede de la parte alta de su atmósfera, con lo que realmente refleja la temperatura de las nubes, pero no de la superficie. Durante la década de 1960, varias sondas soviéticas del programa Venera consiguieron descender a través del manto

de nubes e incluso posarse sobre su superficie, cuya temperatura resultó ser superior a los 400 °C, ¡capaz de fundir el plomo! Este resultado, unido a una presión atmosférica aplastante, 90 veces mayor a la terrestre, y una lluvia continua de ácido sulfúrico, hicieron ver que Venus distaba mucho de ser el vergel soñado por algunos.

Así pues, ninguno de nuestros vecinos cercanos parece reunir condiciones propicias para la vida, al menos, en la forma en que la conocemos. Mercurio y Venus son demasiado calientes; Marte, demasiado frío. Pero ¿qué hay de nuestros vecinos más lejanos, los llamados planetas exteriores? Júpiter y Saturno son dos inmensas esferas gaseosas, compuestas fundamentalmente de hidrógeno, y sin una superficie sólida definida. Urano y Neptuno también poseen una gruesa cubierta de hidrógeno, pero sus interiores son esencialmente de hielo. La llegada de las sondas estadounidenses Pioneer y Voyager a finales de la década de 1970 puso al descubierto una compleja y violenta actividad atmosférica, con tormentas casi permanentes, algunas del tamaño de nuestro planeta (como la Gran Mancha Roja de Júpiter), y vientos huracanados que recorren el planeta de este a oeste, o en sentido contrario, una versión extrema de nuestros vientos alisios. En definitiva, también nuestros vecinos del sistema solar exterior poseen condiciones muy alejadas de lo que se consideraría un planeta habitable.

No menos sorprendentes fueron los hallazgos en las lunas que acompañan a los planetas exteriores. Con una temperatura en superficie de unos -180 °C, Titán, la mayor luna de Saturno, representa una especie de versión helada de la Tierra. Posee una densa atmósfera que, al igual que la terrestre, está compuesta fundamentalmente de nitrógeno. Además, tiene nubes y lagos, pero no de agua, que estaría congelada, sino de metano (gas natural). Las lunas Europa (de Júpiter) y Encélado (de Saturno) poseen una corteza de hielo, pero los géiseres de vapor de agua que emanan violentamente de su superficie son una prueba de la existencia de un océano interior e incluso de aguas termales. ¿Quizá un archipiélago de habitabilidad, perdido en el gélido sistema solar exterior?

De este breve repaso del clima de nuestros vecinos cercanos y lejanos se desprende que la Tierra es un lugar único en nuestro sistema solar. Solo nuestro planeta alberga abundante agua en su superficie en sus tres estados (sólido, líquido y gaseoso), hecho que ha sido determinante para la existencia y la durabilidad de la vida. El campo magnético generado por su interior nos protege del bombardeo constante de las partículas provenientes del Sol, el llamado viento solar, mientras que una fina y tenue capa de ozono protege a la vida de los perniciosos rayos ultravioleta. El dióxido de carbono de nuestra atmósfera, aunque presente en 3 de cada 10 000 partes, genera el efecto invernadero necesario para elevar la temperatura del planeta por encima del punto de congelación, pero en la medida justa para no superar el punto de ebullición, que evaporaría nuestros océanos y desencadenaría el infierno en el que parece atrapado el clima de Venus desde hace miles de millones de años.

Aunque otros planetas podrían haber desarrollado formas muy diferentes de vida a la nuestra, que no requieran de todas estas condiciones, lo cierto es que, después de décadas de exploración espacial, no se ha encontrado el más mínimo vestigio de vida en ningún otro planeta ni en ninguna otra luna de nuestro sistema solar. ¿Por qué ningún otro planeta reúne las condiciones, aparentemente privilegiadas, que se dan en la Tierra? ¿A qué se debe el clima sofocante de Venus o la aridez del desolado Marte? ¿Disfrutaron quizá en el pasado de climas más benignos, como el que ahora disfruta la Tierra? ¿Podrían los océanos interiores de las lunas de los planetas exteriores reunir las condiciones aptas para la vida? Y, por último, ¿se encamina la Tierra hacia alguno de estos destinos? A estas cuestiones, y a otras más, intentaremos dar respuesta a lo largo de este libro.

CAPÍTULO 1

Un punto azul pálido

Comparado con los otros planetas del sistema solar, nuestro planeta parece poseer unas condiciones únicas y privilegiadas para el desarrollo de la vida: una temperatura benigna que permite la existencia de abundante agua en estado líquido, una atmósfera rica en oxígeno y una capa de ozono que lo protege de los dañinos rayos ultravioleta.

«¡Veo la Tierra! La visibilidad es buena... Lo veo casi todo. Se aprecia un cierto margen de espacio bajo la cubierta de cúmulos. Prosigo el vuelo. ¡Todo va bien!». Así se dirigía el 12 de abril de 1961 Yuri Gagarin desde la nave Vostok 1 a los ingenieros soviéticos que seguían el primer vuelo de un ser humano en órbita. Aunque solo disponemos del registro sonoro de este histórico viaje, podemos imaginar la impresión que causó en el astronauta ruso la visión de la Tierra desde la escotilla de su cápsula. Gagarin tuvo el privilegio de ser el primer hombre en contemplar el azul intenso de los océanos, ocultos por el manto de nubes en continuo movimiento, y el fino y tenue velo azulado perfilando el contorno de la Tierra, iluminado por la luz solar. Durante este primer vuelo Gagarin lo describió así:

El cielo es completamente negro, y contra el fondo de este cielo negro las estrellas aparecen en cierto modo más brillantes y diferenciadas. La Tierra presenta un halo azul muy hermoso y característico, que se ve muy bien al observar el horizonte. Hay una suave transición de color que va del azul celeste, al azul, azul marino y púrpura, para acabar en el tono

completamente negro del cielo. Es una transición realmente bella.

Esta panorámica relatada por Gagarin poco tiene que ver con la que tendríamos si sobrevoláramos cualquier otro planeta de nuestro sistema solar. En ninguno de ellos observaremos océanos ni nuestra azulada atmósfera. Por contra, encontramos mundos tórridos como Mercurio o Venus, los más próximos al Sol, y otros gélidos, como Urano o Neptuno. Es natural pensar que las condiciones singulares del clima terrestre son una consecuencia de nuestro lugar privilegiado en el sistema solar, de manera que aquellos planetas más cercanos al Sol, al recibir más cantidad de radiación del astro rey, serán más cálidos, mientras que aquellos más lejanos, por la razón inversa, poseerán climas más fríos. Pero, de ser así, ¿no debería la Luna gozar de un clima similar al nuestro? Mucho antes de que el hombre pisara por primera vez nuestro satélite ya se sabía que era un lugar bastante inhóspito. Su paisaje árido y rocoso, sin ningún vestigio de vida, ya fue descrito por Galileo en la primera década del siglo XVII. Tampoco posee atmósfera. De tener una con un cierto espesor, observaríamos su borde difuso al darle la luz del Sol y, al interponerse la Luna entre nosotros y alguna estrella, veríamos palidecer el brillo de la estrella justo al atravesar la atmósfera. Para darnos cuenta del enorme impacto que la ausencia de atmósfera posee sobre el clima lunar, basta comparar su temperatura media con la de la Tierra. En el ecuador terrestre, la temperatura media es de unos 27 °C, nada que ver con los -53 °C de nuestro satélite. Las variaciones entre el día y la noche también son notables. En la parte iluminada por el Sol la temperatura alcanza los 100 °C, pero en la cara oculta, donde reina la noche lunar, la temperatura desciende drásticamente hasta unos -133 °C. No hay ningún lugar en la Tierra que experimente semejantes temperaturas. ¿A qué se debe esta dramática diferencia? Un candidato natural sería la atmósfera terrestre, pero no es esta la única explicación posible. De hecho, en el pasado algunos científicos atribuyeron la bondad del clima terrestre al calor proveniente del interior del planeta. La existencia de esta fuente de calor queda bien patente a través de las erupciones volcánicas.

En 1827, el físico y matemático francés Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768-1830) se planteó también esta y otras cuestiones relacionadas con la transferencia de calor y, tras estudiar el problema concienzudamente, plasmó los resultados de sus investigaciones en un influyente tratado titulado *Teoría analítica del calor*. En relación a la cuestión planteada arriba, concluyó certeramente que el flujo de calor desde el interior de la Tierra es insignificante en comparación con la energía que recibe del Sol. Esta conclusión se aplica a otros planetas rocosos como el nuestro, así como a sus lunas, y la razón

El calor, como la gravedad, penetra todas las sustancias del universo, sus rayos ocupan todos los lugares del espacio.

JOSEPH FOURIER

es que la roca es un buen aislante del calor de manera que, aun suponiendo que el núcleo terrestre está conformado por roca fundida a gran temperatura, esto no sería suficiente para explicar la elevada temperatura de la superficie terrestre.

Descartada esta posibilidad, queda claro que la atmósfera juega un papel fundamental como agente regulador del clima terrestre con lo que, antes de asomarnos a nuestros vecinos más cercanos del sistema solar, conviene que nos detengamos para entender un poco mejor la atmósfera de nuestro planeta.

UN PLANETA ENVUELTO POR CAPAS DE GASES

La Tierra se encuentra envuelta en una capa de aire compuesta principalmente de nitrógeno (78%) y oxígeno (21%) y pequeñas cantidades de dióxido de carbono y agua. El 75% de esta masa de aire se concentra a una altitud inferior a los 11 km. Esta región recibe el nombre de *troposfera*. En promedio, la temperatura de la troposfera es máxima a nivel del mar y desciende gradualmente con la altura. Esto es debido a que la radiación solar calienta la superficie de la Tierra y este calor se transmite al aire con el que está en contacto. Las características de la troposfera determinan en gran medida el clima terrestre. En ella se forman las nubes y, por tanto, tienen lugar las precipitaciones en todas sus

¿CÓMO MEDIR LA TEMPERATURA DE UNA ESTRELLA O PLANETA?

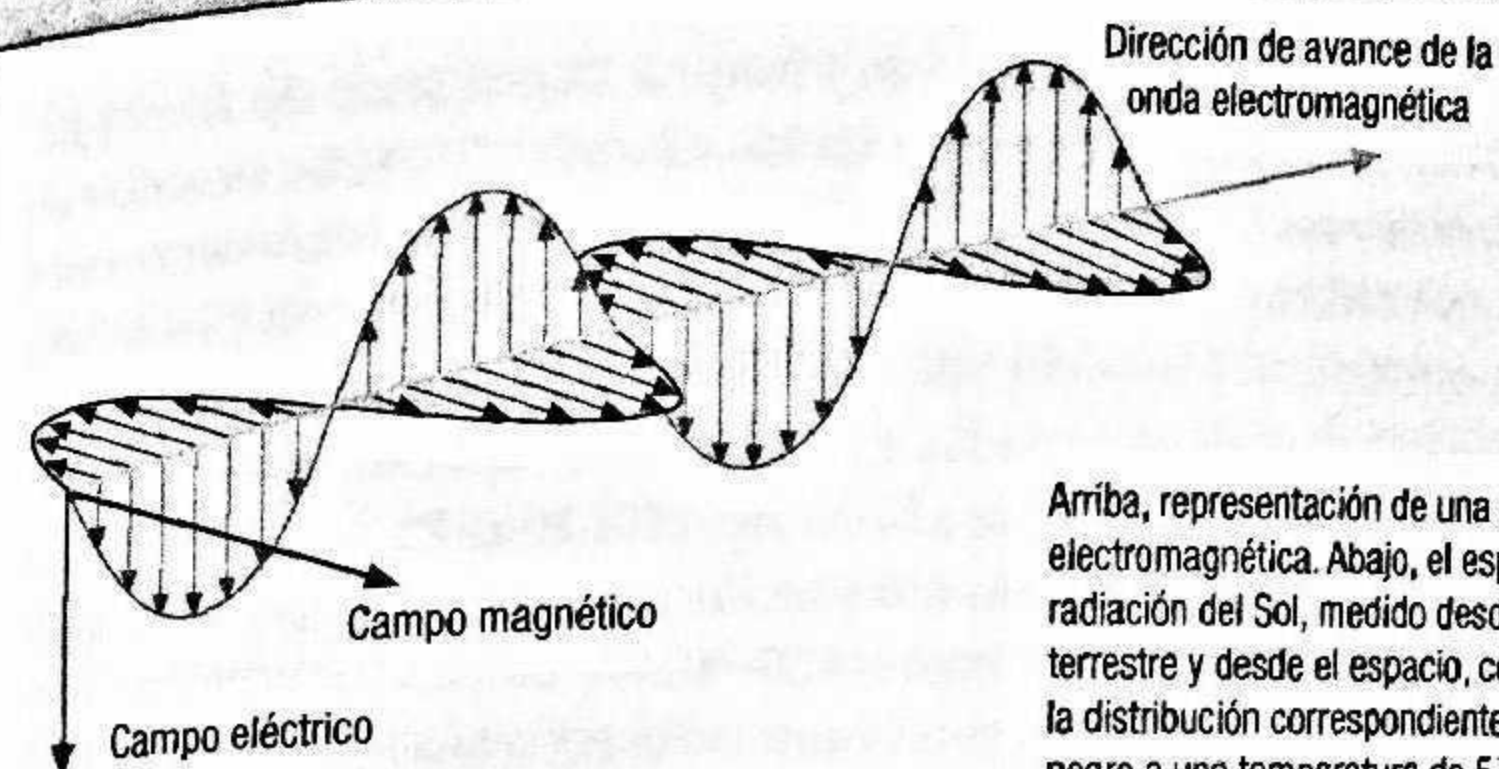
El método para hacerlo consiste en establecer la relación existente entre la longitud de onda y la temperatura absoluta de un cuerpo. La luz consiste en una onda electromagnética (ver figura) compuesta por dos campos, uno magnético y otro eléctrico, perpendiculares entre sí y cuya intensidad varía periódicamente en el tiempo. En el vacío, las ondas electromagnéticas se propagan a una velocidad constante de 300 000 km/s. Una característica fundamental de estas ondas es la distancia entre crestas, conocida como *longitud de onda*. Esta determina la energía que porta la onda, siendo mayor cuanto menor es su longitud de onda. Al conjunto de todas estas longitudes de onda se le llama *espectro electromagnético*. El ojo humano es un sofisticado sensor capaz de registrar estas ondas dentro de una franja comprendida entre 400 y 700 nanómetros (1 nm = 0,000000001 m, o una milésima de micra), lo que se conoce como *espectro visible*. Las diferentes longitudes de onda son interpretadas por el cerebro como colores, correspondiendo las longitudes de onda más cortas (más energéticas) a los colores azulados, y las más largas (ondas menos energéticas) al color rojo. Aunque el ojo humano no es capaz de percibir ondas fuera de este rango, hay dispositivos que sí permiten hacerlo. Por ejemplo, las cámaras infrarrojas permiten «ver» la radiación de longitud de onda algo más larga que el rojo.

A mayor temperatura, menor longitud de onda

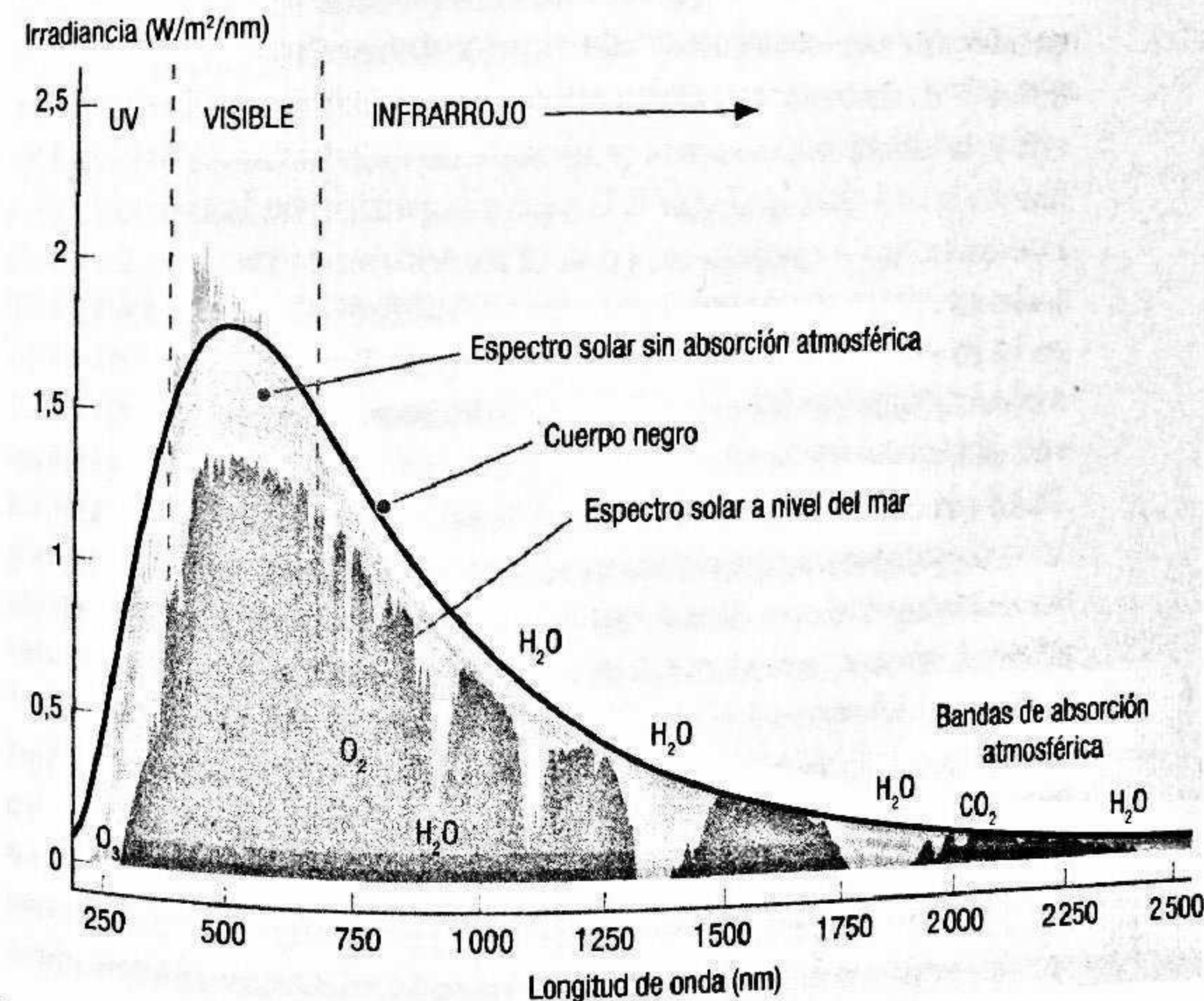
Cualquier cuerpo, por el hecho de encontrarse a una cierta temperatura, emite radiación en todo el rango del espectro electromagnético, siendo máxima la intensidad de emisión para una cierta longitud de onda. A mayor temperatura, esta longitud de onda preferente se hace menor. En 1893, el físico alemán Wilhelm Wien (1864-1928) encontró una sencilla relación entre la temperatura absoluta de un cuerpo y la longitud de onda a la que se produce el pico de emisión, dada por

$$\lambda_{\max} = \frac{0,002898}{T}$$

donde T es la temperatura absoluta y λ_{\max} es la longitud de onda del pico, en metros. Aunque esta relación se cumple estrictamente para los llamados *cuerpos negros* (una idealización de un objeto que absorbe toda la luz que recibe, sin reflejar nada) es aproximadamente válida para los objetos «reales», de ahí su utilidad. Por ejemplo, la luz que nos llega del Sol se asemeja a la de un cuerpo negro para una temperatura de unos 5800 K que, según la ley de Wien, correspondería a una longitud de onda de 501 nm, que se sitúa en la zona del espectro visible (corresponde a una tonalidad verde). El hecho de que el ojo humano capte luz justo en la franja del espectro donde la radiación solar es máxima puede entenderse como una adaptación evolutiva. La radiación solar es parcialmente absorbida por la atmósfera. Por ejemplo, el ozono absorbe la mayor parte de la radiación ultravioleta, mientras que algunas moléculas, como el dióxido de carbono o el vapor de agua, absorben selectivamente en algunas frecuencias (ver figura).



Arriba, representación de una onda electromagnética. Abajo, el espectro de radiación del Sol, medido desde la superficie terrestre y desde el espacio, comparado con la distribución correspondiente a un cuerpo negro a una temperatura de 5773 K. Se observan las líneas de absorción de algunos componentes de la atmósfera, como el vapor de agua o el dióxido de carbono.



formas (agua, nieve, granizo...). Hay que decir que, hasta entrado el siglo xx, poco más se sabía de las propiedades de la troposfera. Uno de los pioneros de su estudio y precursor de la meteorología moderna fue el francés Léon Philippe Teisserenc de Bort (1855-1913). Desde su laboratorio en las afueras de París, donde se estableció en 1896, realizó numerosos experimentos con cometas y globos sonda, con los que fue capaz de medir con precisión la temperatura y presión en función de la altitud. Comprobó que la temperatura descendía gradualmente a razón de unos 6°C cada 1000 m, hasta una altura de 11,2 km. Por encima de esta altura, curiosamente, la temperatura dejaba de descender y se estabilizaba alrededor de los -55°C .

Este resultado tenía una consecuencia inmediata para el clima terrestre. Las masas de aire se calientan en la parte baja de la troposfera, ascendiendo por convección (al igual que lo hace, por ejemplo, el agua caliente en una olla puesta al fuego), al tiempo que se van expandiendo y enfriando. Como la temperatura de la atmósfera disminuye con la altitud, la diferencia de temperatura entre la masa ascendente y el aire circundante se va haciendo menor hasta que, al llegar a la parte superior de la troposfera, conocida como *tropopausa*, cesa el movimiento convectivo (transferencia de calor entre zonas con distintas temperaturas). Esta es la razón por la cual las nubes, que se forman también debido a este fenómeno de convección, adquieren su característica forma achatada al verse frenadas en la tropopausa. Teisserenc de Bort concluyó que la atmósfera terrestre consistía en una capa inferior, la troposfera, caracterizada por el gradiente térmico que él había medido, y donde se producen los fenómenos meteorológicos, y una capa superior, más estable, a la que bautizó como *estratosfera*.

Además de la temperatura, otro factor determinante para el clima y la meteorología del planeta es la presión atmosférica. Esta se corresponde con el peso que ejerce el aire de la atmósfera por unidad de área. Supongamos que dibujamos un cuadrado de un metro de lado en el suelo. Podemos imaginar una columna de aire sobre dicho cuadrado que se extiende verticalmente desde la propia superficie terrestre hasta la extinción de la atmósfera.

El peso que ejerce dicha columna de aire dependerá de cómo varía la densidad del aire en función de la altura, ya que, cuanto mayor sea su densidad, mayor será también su peso. También dependerá de si estamos a nivel del mar, o sobre una meseta o montaña, ya que, en este último caso, la columna de aire será menor y, por tanto, también la presión. En promedio, para un punto situado a nivel del mar, la presión atmosférica corresponde al peso equivalente a nada menos que 10 toneladas por metro cuadrado. Puesto en estos términos, parece sorprendente que no sintamos con mayor vehemencia la presencia de la presión atmosférica en nuestra vida cotidiana. La razón es que los organismos vivos nos hemos adaptado para generar una presión que contrarreste a la atmosférica. El valor medio de la presión atmosférica, a nivel del mar, resulta una unidad conveniente para comparar las presiones en diferentes medios, diferentes alturas o, para los propósitos de este libro, en distintos planetas. Esta unidad se conoce como «atmósfera» (y se abrevia atm) de manera que la presión media sobre la superficie terrestre sería simplemente 1 atm.

Meteorólogos cazando meteoritos

Así, las medidas de Teisserenc de Bort con globos sonda demostraron que la temperatura de la atmósfera iba disminuyendo gradualmente hasta alcanzar los -55°C a una altura de unos 11 km, permaneciendo aproximadamente constante por encima de esta. Pero este resultado se pudo confirmar hasta una altitud de unos 25 km, ya que no era posible elevar globos sonda por encima de esta altura. ¿Qué pasaba más arriba? Teisserenc no lo llegó a saber porque no fue hasta 1922, poco después de su muerte, que el físico alemán Frederick Lindemann y el meteorólogo británico G.M.B. Dobson arrojaron luz al respecto: publicaron unos resultados sorprendentes obtenidos por un método no menos asombroso. Fue tras la Primera Guerra Mundial cuando Lindemann y Dobson aunaron sus esfuerzos para estudiar las propiedades de la atmósfera a altitudes por encima del alcance de los

globos sonda. Para ello, concibieron un ingenioso método consistente en estudiar las trayectorias que dejaban los meteoros al desintegrarse tras entrar en contacto con la atmósfera. Estos meteoros, compuestos fundamentalmente por piedra o hierro, penetran en la atmósfera a gran velocidad (pueden superar los 160 000 kilómetros por hora), evaporándose parcial o totalmente debido al calor producido por el rozamiento. Las partículas que se desprenden colisionan violentamente con las moléculas del aire, arrancando electrones de las mismas, proceso que en física recibe el nombre de *ionización*. Este fenómeno da lugar al característico destello que ha hecho que los meteoros sean conocidos popularmente como estrellas fugaces. Empleando leyes termodinámicas (la rama de la física que estudia los fenómenos asociados con el calor y su transmisión), Lindemann y Dobson obtuvieron expresiones matemáticas que relacionaban la densidad y la temperatura de la región de aire por la que había pasado el meteorito con la velocidad del mismo, su altura y el brillo y la longitud de la estela dejada. A finales de 1922, publicaron sus resultados en las prestigiosas actas de la Royal Society de Londres en un trabajo titulado «Una teoría de meteoros, y de la densidad y temperatura de la atmósfera exterior a la que conduce», en el que desarrollaban su teoría y la aplicaban a cientos de medidas realizadas en su mayor parte por astrónomos aficionados. Para alturas de entre 30 y 50 km, las temperaturas predichas por la teoría de Lindemann y Dobson eran consistentes con los valores obtenidos por medidas directas mediante globos sonda, lo cual sirvió para validar su método. Sin embargo, para alturas donde ya no existían medidas directas, la teoría arrojaba un resultado tan sorprendente como inesperado. En lugar de disminuir o estabilizarse, como suponía Teisserenc de Bort, la temperatura aumentaba con la altura. Por ejemplo, según sus cálculos, a una altura de 48 km de altitud, dicha temperatura sería de unos agradables 21 °C. Además, la casi total ausencia de estrellas fugaces a altitudes entre 50 y 60 km indicaba, según los autores, que este aumento de temperatura ocurriría de forma repentina a una altura de unos 60 km. Lindemann y Dobson fueron más allá y, convencidos de su resultado, se aventuraron a dar una

explicación para este inesperado fenómeno. Debía estar produciéndose algún tipo de proceso a dichas altitudes que «absorbiera» la radiación solar y produjera el citado calentamiento. Los gases más abundantes, O_2 y N_2 , parecían descartados ya que son prácticamente «transparentes» a la radiación solar. Finalmente, se decantaron por el ozono, cuya molécula está compuesta por tres átomos de oxígeno ya que, a pesar de encontrarse en la atmósfera en cantidades ínfimas, posee una gran capacidad de absorción de la radiación solar en la región ultravioleta. Por aquel entonces resultó una conjetura aventurada, hasta el punto de que buena parte de la comunidad científica recibió con escepticismo estos resultados. Sin embargo, poco a poco, se fueron acumulando otras evidencias experimentales que confirmaron la hipótesis de Lindemann y Dobson.

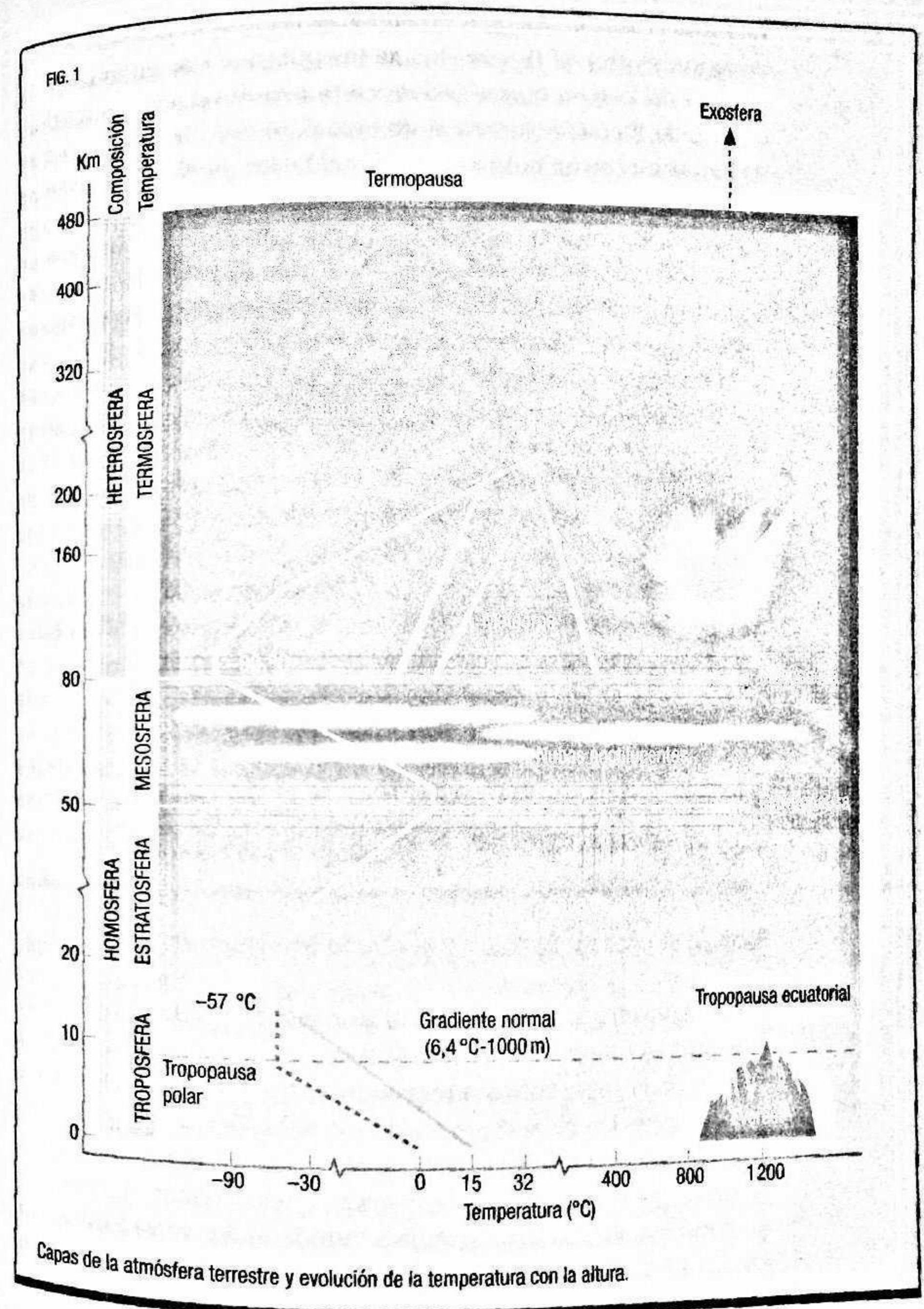
Hoy sabemos que el ozono se forma cuando la radiación ultravioleta de onda corta disocia los dos átomos de la molécula de oxígeno. Estos átomos, químicamente muy activos, se unen a las moléculas de oxígeno «normales» (O_2) para formar moléculas con tres átomos de oxígeno, es decir, ozono. Aunque la concentración de ozono en la atmósfera representa apenas un 0,00001%, su existencia es muy importante para la vida terrestre, ya que absorbe la parte de la radiación solar más energética (y, por tanto, dañina), los conocidos rayos ultravioleta.

Las medidas más recientes han confirmado, al menos cualitativamente, los resultados de Lindemann y Dobson. La temperatura crece progresivamente en la estratosfera hasta una altura de unos 50 km, donde alcanza su valor máximo, en torno a los 0 °C. Este punto se toma como el límite superior de la estratosfera y se denomina *estratopausa*. Por encima de la estratopausa, la temperatura vuelve a descender, hasta alcanzar un valor mínimo de unos 100 °C, para una altura de unos 80 km. Este valor depende realmente de la latitud y la estación del año, habiéndose registrado temperaturas de hasta -140 °C, el valor más bajo en toda la atmósfera. En esta región de temperatura decreciente, conocida como *mesosfera*, es donde empieza a arder la mayor parte de los meteoros. Se forman también unas tenues y poco conocidas nubes formadas por cristales de hielo, llamadas

nubes noctilucentes, que solo son visibles tras la puesta de Sol, en latitudes cercanas a los casquetes polares. Por encima de la mesosfera, la temperatura vuelve a subir. Aunque es muy difícil realizar mediciones a altitudes tan elevadas, se estima que la temperatura puede alcanzar valores de casi 2000 °C a una altura de 300 km. Es por ello que esta zona se conoce con el nombre de *termosfera*. Por encima de los 480-500 km, la termosfera da lugar a otra región más externa, conocida como la *exosfera*. Aquí, la densidad es extremadamente baja (los átomos de los gases que la constituyen se encuentran tan dispersos que recorren unos 10 km antes de chocar con otro). Es difícil determinar con exactitud dónde acaba la exosfera y empieza el espacio interplanetario, pues se trata de un cambio gradual; las moléculas van haciéndose más y más escasas hasta extinguirse a una altura comprendida entre los 500 y los 1500 km (figura 1).

Una coraza magnética a prueba de chorros de partículas

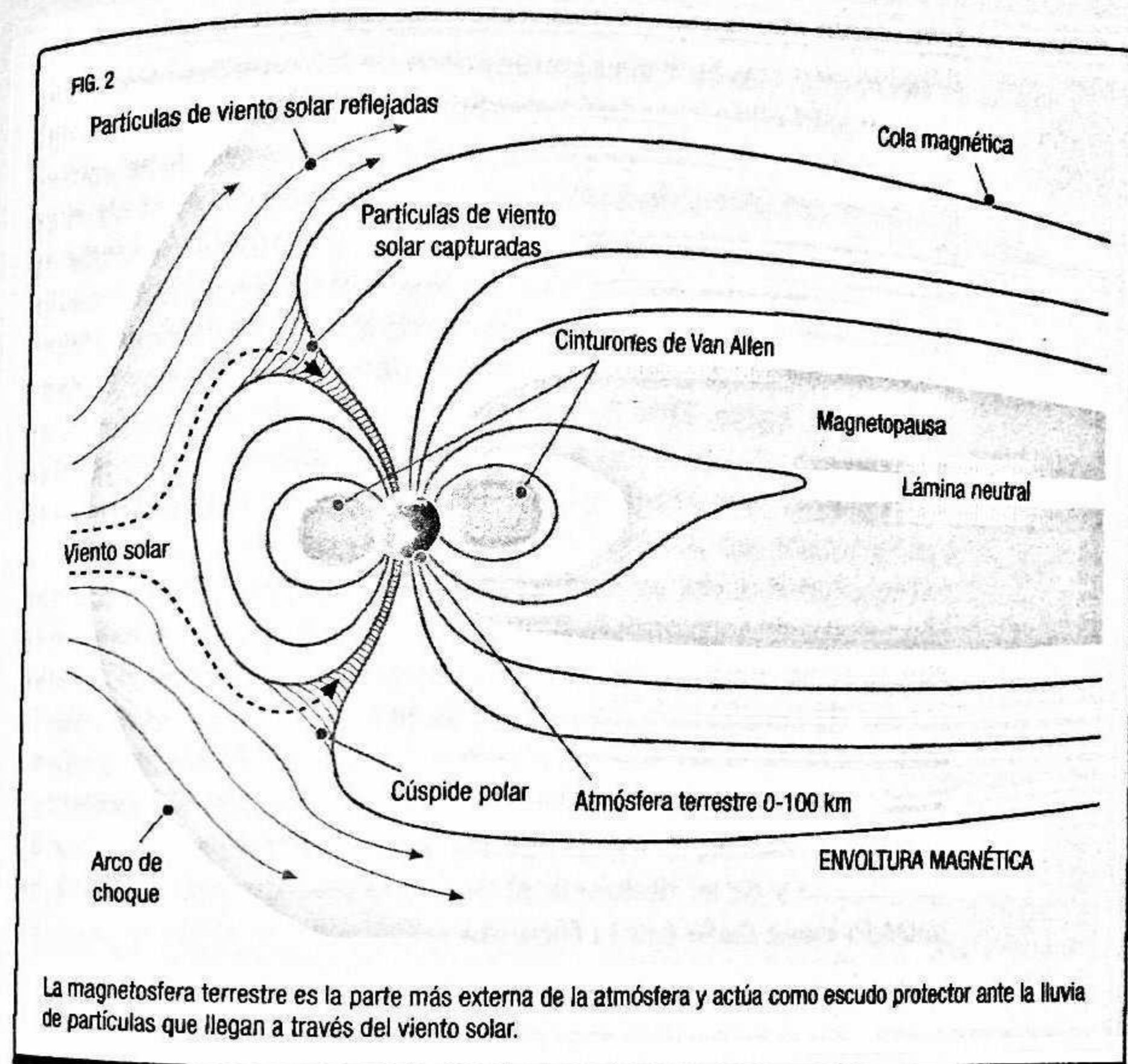
Hasta finales de la década de 1950 se creía que más allá de la exosfera solo existía el vacío interplanetario, situación que cambió tras las mediciones del satélite estadounidense Explorer I, en 1958. Desde una órbita a 2400 km de altitud, el satélite comenzó a detectar todo un mar de partículas, a pesar de que a esta altura la atmósfera debería haberse extinguido completamente. Realmente, lo que estaban detectando era el llamado *viento solar*, una oleada de partículas cargadas, compuesta principalmente por protones y electrones, que son eyectadas del Sol a velocidades medias de 1600000 kilómetros por hora. ¿Por qué este torrente continuo de partículas no llegaba a la superficie terrestre? La explicación que encontró el físico estadounidense responsable de la misión, James van Allen (1914-2006), era que el campo magnético terrestre se encargaba de desviar dichas partículas. La Tierra se comporta como un gigantesco imán, cuyos polos norte y sur coinciden, aproximadamente, con los polos sur y norte geográficos, respectivamente. Cuando una partícula cargada se mueve en el seno de un campo magnético experimenta



una fuerza que la obliga a moverse en espiral a lo largo de las llamadas *líneas de fuerza* (líneas imaginarias que indican la dirección del campo magnético en cada punto del espacio). En el caso de la Tierra, como en el de cualquier otro imán, las líneas de fuerza van de un polo a otro. Al incidir las partículas cargadas del viento solar, son desviadas por el campo magnético, haciendo que se muevan en espiral de un polo al otro. Van Allen y su equipo descubrieron dos regiones en forma de rosquilla, una más externa y otra más interna, en las que se acumulan las partículas cargadas atrapadas por el campo magnético terrestre, impidiendo que alcancen su superficie. Estas dos regiones, que también se han observado en otros planetas, son conocidas desde entonces como *cinturones de Van Allen* y se extienden desde los 1000 a los 60 000 km sobre la superficie de la Tierra. Los cinturones de Van Allen constituyen la parte interior de una región aún más extensa, la llamada *magnetosfera*, una gigantesca envoltura magnética que rodea la Tierra (figura 2). El viento solar se encuentra con esta envoltura a unos 64 000 km, la cual lo desvía y lo obliga a fluir alrededor de la Tierra. Parte del viento solar penetra en las cúspides polares donde las partículas pueden ser «capturadas» por los cinturones de Van Allen. En estas regiones polares, estas partículas también arrancan o excitan los electrones de los átomos y moléculas de la atmósfera, produciendo las espectaculares auroras polares, visibles en latitudes próximas a los polos.

Fourier, el *chaleur obscure* y el efecto invernadero

Para responder a la pregunta de por qué la temperatura media terrestre es mucho mayor que la lunar, volveremos de nuevo al trabajo de Fourier sobre la teoría del calor y su aplicación al clima terrestre. De él se desprende que, si la Tierra absorbe continuamente energía del Sol, debería tener también algún mecanismo para perder parte de esta energía. De lo contrario, razonó el matemático, la energía se habría acumulado desde su formación, aumentando indefinidamente la temperatura y convirtiendo la Tierra en un lugar inhabitable. Fourier era consciente de que los



planetas se movían en sus órbitas a través de un espacio casi vacío y, por tanto, no podría perder calor mediante la fricción con un hipotético medio interestelar. Sugirió entonces que la pérdida de energía debía ocurrir por la emisión de un tipo de radiación que se propagara por el espacio vacío. Un tipo de radiación con estas características había sido descubierta apenas 25 años antes por el físico anglo-germano William Herschel (1738-1822), con lo que Fourier supuso que se trataba de la misma radiación, a la que se refiere en sus escritos como «*chaleur obscure*» (calor oscuro). Hoy en día sabemos que esta misteriosa emisión no es otra cosa que radiación infrarroja, luz de longitud de onda mayor que la del

espectro visible. La atmósfera deja pasar la mayor parte de la luz solar, lo cual conduce al calentamiento de la superficie terrestre. Fourier sabía que la emisión de radiación infrarroja aumentaba rápidamente con la temperatura, con lo que la superficie terrestre devolvería parte de la radiación absorbida en forma de esas ondas de larga longitud. Y es aquí donde la atmósfera juega un papel fundamental, ya que esta es bastante opaca a dicha radiación, de manera que el calor radiado por la superficie de la Tierra quedaría «atrapado» en la atmósfera, aumentando la temperatura media del planeta. Este fenómeno es similar al que ocurre en un invernadero, de ahí el nombre de «efecto invernadero», si bien hay que decir que Fourier no llegó a establecer esta analogía, ni a utilizar este término en su ensayo.

Para hacerse una idea más cuantitativa de la importancia del efecto invernadero para la temperatura de un planeta, los astrofísicos recurren al concepto de *temperatura efectiva* o *temperatura de equilibrio* (T_e), que sería la temperatura que tendría dicho planeta si no consideráramos el efecto de su atmósfera. Esta temperatura se determina a partir del balance energético entre la radiación recibida del Sol (que dependería del tamaño del planeta y de su distancia al Sol) y la energía reflejada. El resultado viene dado por la fórmula

$$T_e = 279 \left(\frac{1-a}{d^2} \right)^{1/4}$$

donde d es la distancia del planeta al Sol medida en unidades astronómicas (UA), siendo 1 UA la distancia media Tierra-Sol, y a el albedo del planeta, que es la fracción de energía reflejada por la superficie, en tanto por uno. Así, por ejemplo, la Tierra refleja un 33% de la luz recibida del Sol, de manera que su albedo es 0,33. La temperatura obtenida con esta fórmula viene expresada en la llamada *escala absoluta*, y se mide en kelvins (K). Su relación con la escala Celsius viene dada por $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273$, de manera que el cero absoluto corresponde a -273°C . Este es un valor de gran importancia ya que, según la termodinámica, esta es la temperatura mínima posible en el universo.

Si aplicamos esta fórmula al caso de la Tierra obtenemos una temperatura efectiva de 249 K (o -24°C). Comparando con el valor medio de la temperatura terrestre (15°C), vemos la enorme importancia del efecto invernadero en nuestro planeta. En el caso de la Luna, dado que su distancia media al Sol es igual a la de la Tierra, podemos usar la misma fórmula, cambiando apenas el valor del albedo, que en el caso de nuestro satélite es $a=0,12$. Esto proporciona la temperatura de equilibrio de 270 K (-3°C). Como ya hemos visto, la temperatura media lunar experimenta grandes variaciones día/noche, pero usando el valor medio de la temperatura media ecuatorial (-53°C) vemos que es incluso menor que la predicción de este modelo. Esto nos dice, por un lado, que no hay efecto invernadero en la Luna y, por otro, que el modelo conducente a la fórmula dada arriba es demasiado sencillo (entre otras cosas, el modelo desprecia la rotación lunar). Aun así, nos da una idea de la importancia que tiene la atmósfera sobre la temperatura de un determinado planeta o luna.

Al incluir el efecto de la atmósfera, en el caso de los planetas que, como el nuestro, gozan de ella, el balance energético entre la radiación recibida del Sol, y la devuelta al espacio, el problema se vuelve mucho más complejo.

UNA ATMÓSFERA EN CONTINUO MOVIMIENTO

El calentamiento desigual de las diferentes partes del planeta y el efecto de la rotación terrestre, provocan un continuo movimiento de las masas de aire de la atmósfera, dando lugar a un intrincado sistema de circulación. A pesar de su complejidad, este sistema de vientos muestra una sorprendente regularidad a escala global. El conocimiento de los sistemas de vientos permitió a los antiguos navegantes establecer rutas marinas para surcar los océanos en ambos sentidos. Así, el descubrimiento de los vientos alisios, que soplan del noreste en el hemisferio norte en las cercanías del ecuador, permitió al explorador de origen italiano Cristóbal Colón atravesar el océano Atlántico y alcanzar las costas americanas en el siglo xv. Gracias a la suerte, intuición,

o a algún conocimiento previo no confesado por el marino genovés, también fue capaz de encontrar a latitudes más altas los vientos del oeste que le trajeron de vuelta a Europa a través de las Azores. Siguiendo los pasos de Colón, otros marinos aprendieron a localizar y aprovechar estos vientos alisios, pero hubo que esperar casi 200 años hasta que se diera una primera explicación coherente de su existencia. Esta fue propuesta en 1686 por el astrónomo inglés Edmond Halley (1656-1742). Su idea era que, en las zonas ecuatoriales, al incidir la radiación solar de forma más directa, se produciría un mayor calentamiento de las masas de aire, favoreciendo su ascenso por convección hacia aquellas altitudes donde se encontraba más rarificado. El «hueco» dejado por estas masas de aire ascendente tendería a ser ocupado por el aire de otras latitudes, dando lugar a los vientos alisios.

Esto explicaba solo parcialmente el fenómeno, pues no acertó a dilucidar por qué estos vientos se movían de este a oeste. Esta parte fue explicada más tarde por su compatriota el meteorólogo George Hadley (1685-1768), que, aunque abogado de profesión, era un gran amante de las ciencias naturales. En 1735 presentó un artículo con su interpretación de los vientos alisios en la Royal Society de Londres. Estaba de acuerdo con Halley en que el aire caliente del ecuador tendería a ascender. Por otro lado, la masa de aire ascendente, una vez alcanzara la parte superior de la troposfera, cesaría su movimiento vertical y comenzaría a desplazarse horizontalmente, en dirección a ambos polos. Durante este camino, se iría enfriando, descendiendo y regresando de nuevo al ecuador para cerrar el ciclo. Estas corrientes de aire que, de forma cíclica, recorren el camino de ida y vuelta del ecuador a los polos reciben el nombre de *células de Hadley*. En cuanto al movimiento este-oeste, Hadley recurrió para su explicación al llamado *efecto Coriolis*, un fenómeno que él supo vislumbrar de forma cualitativa, si bien hubo que esperar 100 años todavía para que el científico francés Gaspard Gustave Coriolis le diera en 1836 una base matemática rigurosa (y también su nombre). Aquí nos bastará con echar mano de la descripción más cualitativa de Hadley. Para ello, imaginemos un ti vivo como el mostrado de forma esquemática en la figura 3 en el que

BALANCE ENERGÉTICO EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

El 99,8 % de la energía que recibe la superficie terrestre proviene del Sol y el resto se debe al calor interno del planeta. Globalmente, el balance energético (o radiativo) es igual a cero, es decir, se libera la misma cantidad de energía que se recibe, aunque esta haya ido cambiando de forma. Parte de la radiación incidente (ver figura) rebota (se dispersa) en las nubes (47 %), otra parte es absorbida por los gases de la atmósfera (22 %) y el resto alcanza directamente la superficie (31 %). De la parte dispersada por las nubes, una fracción termina escapando al espacio exterior y el resto alcanza la superficie.

Efecto invernadero: gases que retienen el calor

De la radiación que llega a la superficie, ya sea de forma directa o indirecta, una parte es reflejada y el resto es absorbida. El resultado neto es que aproximadamente un 45 % de la energía solar termina siendo absorbida por la superficie, haciendo aumentar su temperatura. Parte de este calor es liberado en forma de radiación infrarroja. Es aquí donde entra en juego el efecto invernadero. Algunos gases, como el dióxido de carbono o el vapor de agua, que son transparentes a la radiación visible, absorben de manera muy eficiente la radiación infrarroja y, por tanto, parte de este calor contribuye al aumento de la temperatura del planeta.

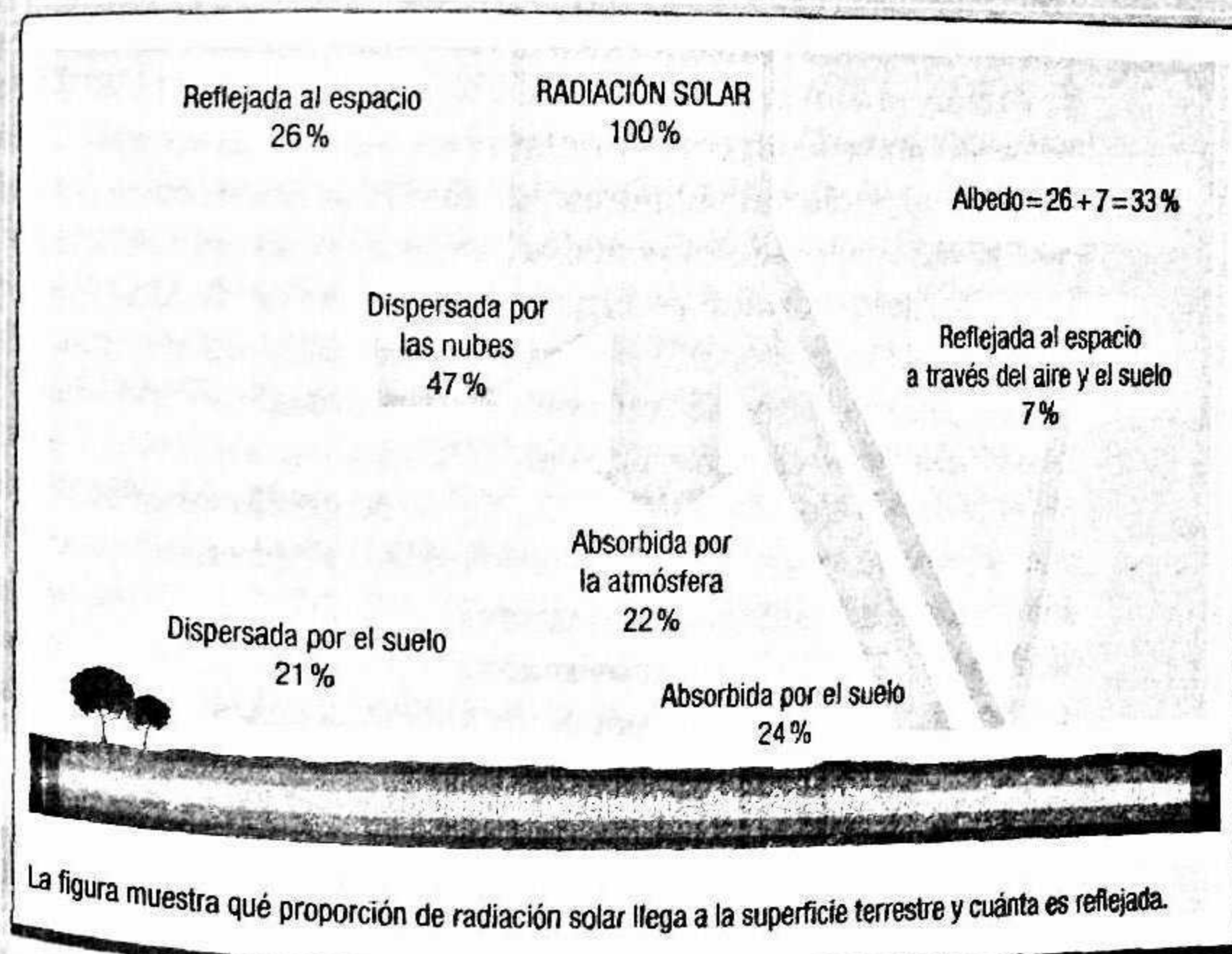


FIG. 3

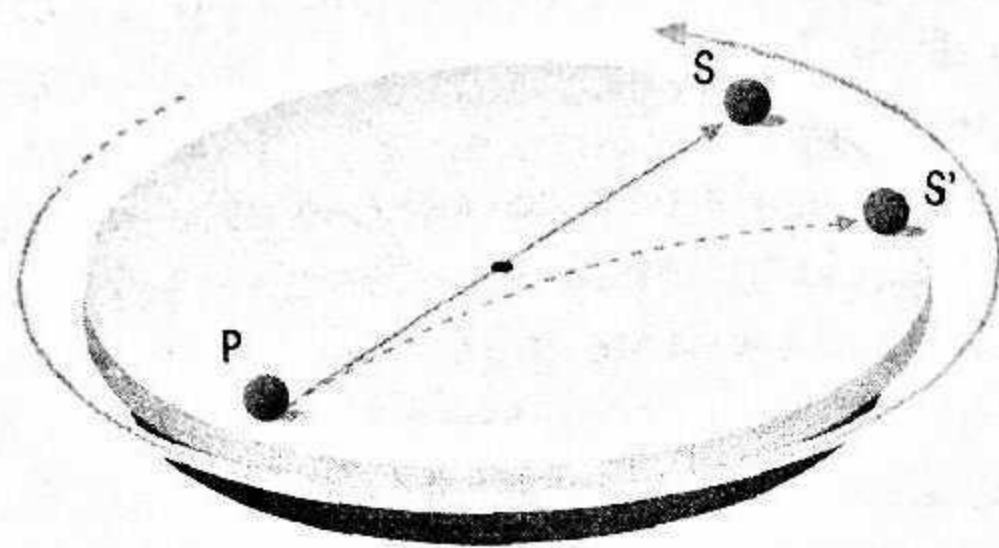


Ilustración del efecto Coriolis en un tiovivo. El fenómeno se observa cuando un cuerpo se halla en movimiento respecto a otro en un sistema de referencia en rotación.

hay montadas dos personas. Paco en el punto P y Sofía en el punto S se encuentran en puntos diametralmente opuestos. En un momento dado, Paco intenta lanzarle una pelota a Sofía. Para frustración del primero y la irritación de la segunda, la pelota no llega a las manos de esta, sino que parece desviarse hacia la derecha de Paco, S'. Vuelve a intentarlo, achacando el problema a su mala puntería, pero una extraña «fuerza» vuelve a desviar la trayectoria en el mismo sentido que antes. Entretanto, una tercera persona, Carmen, observa jocosamente la escena «a vista de pájaro», desde lo alto de una noria. Para ella, está claro lo que está ocurriendo. Mientras la pelota avanza por el aire, Sofía se ha movido de su posición inicial S debido al giro del tiovivo. Por tanto, para Carmen la pelota ha seguido una trayectoria perfectamente rectilínea y ha sido Sofía la que se ha desplazado. En cambio, para Paco y Sofía, que se encuentran en movimiento giratorio, el fenómeno parece deberse a una fuerza misteriosa: la fuerza de Coriolis.

Algo parecido ocurre con el movimiento de los vientos en la Tierra, pensando en esta como si se tratase de un gran carrusel o, mejor dicho, dos diferentes; uno para los habitantes del hemisferio norte y otro para los del hemisferio sur. En el hemisferio norte, los vientos (o cualquier otro objeto en movimiento, por ejemplo, un proyectil de cañón) son aparentemente desviados hacia su derecha, con respecto a la dirección del movimien-

to, por la fuerza de Coriolis. En el hemisferio sur, el efecto es el contrario, es decir, los vientos son desviados hacia la izquierda según avanzan.

Usando esta idea, Hadley razonó que el viento que proviene del polo norte en dirección al ecuador parecerá desviarse hacia el oeste para un observador situado en la superficie terrestre, dando lugar al movimiento conocido de los vientos alisios. Pero para un hipotético observador que pudiera contemplar el fenómeno desde el espacio, es el observador sobre la Tierra el que se está moviendo hacia el este, siguiendo la rotación del planeta.

La explicación de Hadley era esencialmente correcta, salvo por un importante defecto; no existe una única célula de convección, sino tres. La idea de tres células de convección fue propuesta en 1856 por William Ferrel (1817-1891), un maestro de escuela y meteorólogo estadounidense, basándose en el trabajo de Coriolis y en un análisis detallado de los vientos conocidos hasta la fecha (figura 4). Además de la célula de Hadley, en cada hemisferio existe otra a latitudes intermedias, que fue bautizada posteriormente como *célula de Ferrel*, y una tercera a latitudes cercanas al polo, conocida como *célula polar*.

Para entender el esquema general propuesto por Ferrel, es necesario tener en cuenta tres factores. El primero es el de la temperatura. El aire caliente se expande y se hace menos denso («pesa menos»), tendiendo a ascender. Análogamente, el aire frío, más denso, propende a descender. El segundo es la presión. El aire se mueve desde las zonas donde la presión es mayor hacia aquellas de menor presión. Y, por último, la fuerza de Coriolis, que, como sabemos, tiende a desviar las corrientes de aire hacia la derecha en el hemisferio norte, y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

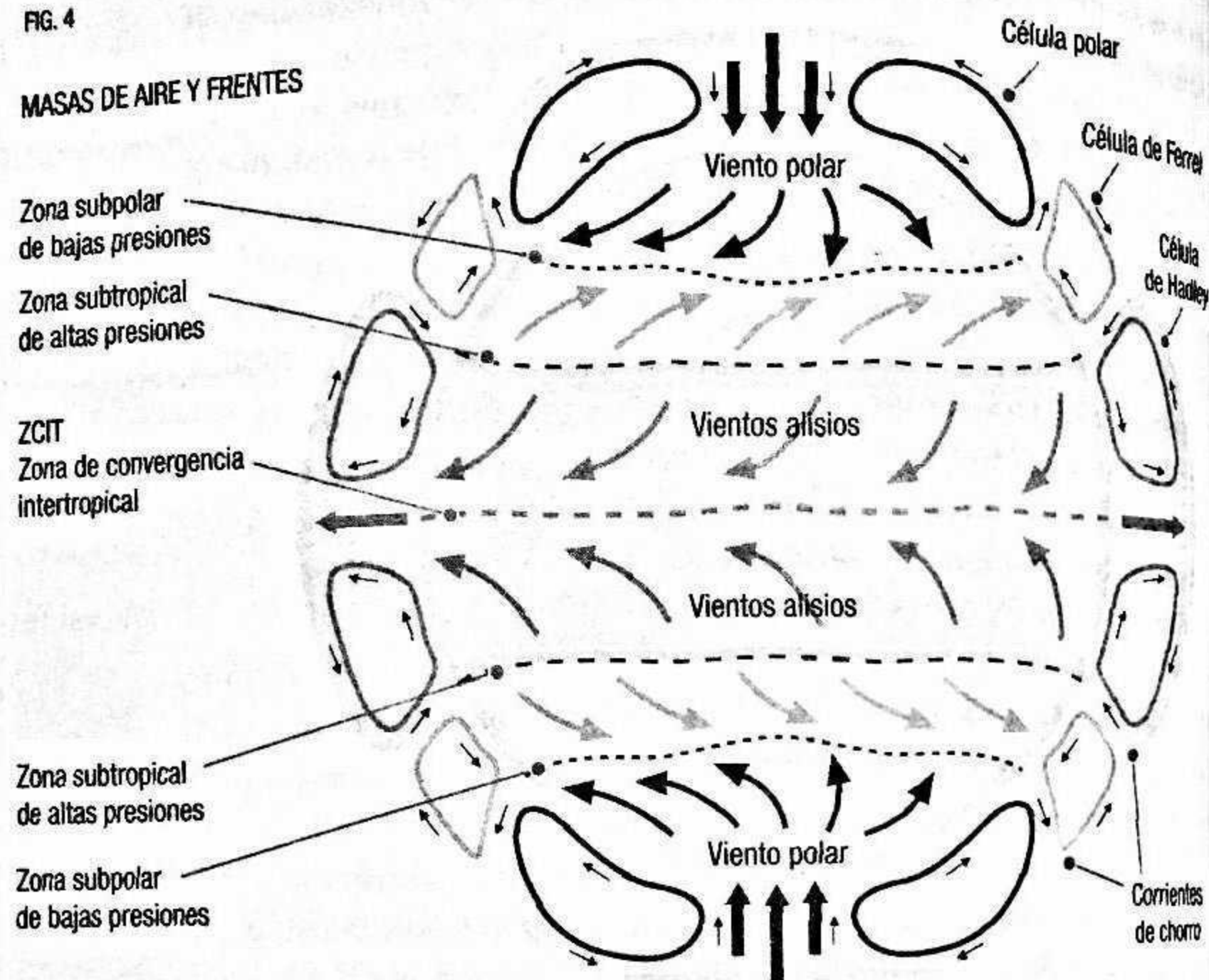
El proceso comienza en el ecuador, donde el aire caliente se eleva debido al calentamiento solar; según asciende, se va enfriando y se desplaza lateralmente hacia ambos hemisferios en dirección a los polos, para volver a descender a una latitud

La Tierra está rodeada por todos lados por un cuerpo extremadamente raro y elástico llamado atmósfera.

WILLIAM FERREL

FIG. 4

MASAS DE AIRE Y FRENTEROS



Circulación atmosférica en la Tierra mostrando las tres células de convección en cada hemisferio, y la dirección preferente de los vientos en las diferentes latitudes.

de unos 30° a ambos lados del ecuador, lo que se conoce como *zona subtropical*. Aquí entra en juego el segundo efecto, esto es, la presión o, más exactamente, las diferencias de presión. El aire caliente, al ser menos denso, también es menos pesado, con lo que las corrientes ascendentes del ecuador van ligadas también a zonas de baja presión atmosférica, también llamadas *ciclónicas*. En las zonas subtropicales el aire es más frío y, por tanto, más denso y pesado, causando una zona de alta presión o *anticiclónica*. Como dijimos, el aire tiende a desplazarse de las zonas de mayor presión a las de menor presión, con lo que este aire frío tenderá a desplazarse luego hasta el ecuador, completando así una primera célula de Hadley. Pero aquí entra en jue-

go el tercer factor, el efecto Coriolis. Al mismo tiempo que los vientos se desplazan al ecuador, la fuerza de Coriolis los desvía hacia el oeste, dando lugar a los vientos alisios que dominan la zona tropical. Parte del aire de las células tropicales es transferido hacia las células de Ferrel sobre las zonas templadas a cada lado del hemisferio. En las células de Ferrel, la circulación es contraria a la de las células tropicales, de manera que el aire que se encuentra cerca de la superficie se dirige hacia los polos, siendo desviado por el efecto Coriolis en dirección este, que es el sentido dominante de los vientos a estas latitudes. Las células polares se originan por un mecanismo similar. El aire frío de los polos desciende, creando una zona de alta presión. Al llegar a la superficie, se desplaza hacia las latitudes templadas, dando lugar a los gélidos vientos del frente polar.

En la frontera entre la célula tropical y la de Ferrel, así como entre esta y la polar, se generan fuertes cambios de temperatura y presión. Esto, unido al efecto Coriolis, da lugar a una rápida corriente de oeste a este, con vientos de 100-200 km/h, que se desplaza alrededor del globo a lo largo de una estrecha franja serpenteante que transcurre a altitudes entre 9000 y 15000 m. Son las llamadas *corrientes de chorro* (o *jet stream*). En occidente, estas corrientes de chorro fueron descubiertas de forma accidental durante la Segunda Guerra Mundial por los bombarderos americanos. Viajando hacia el oeste a través del Pacífico a una altitud de unos 11000 metros de altura, comprobaron que eran frenados por unos fortísimos vientos que soplaban en dirección contraria. Los japoneses, por el contrario, sí parece que conocían de su existencia, porque de hecho las aprovecharon para enviar bombas incendiarias equipadas con dispositivos barométricos para alcanzar la altitud adecuada.

El papel de los continentes y los océanos

El sistema de circulación atmosférica descrito arriba proporciona un mecanismo para distribuir el calor, transfiriéndolo de las zonas ecuatoriales, más cálidas, a las latitudes mayores, donde

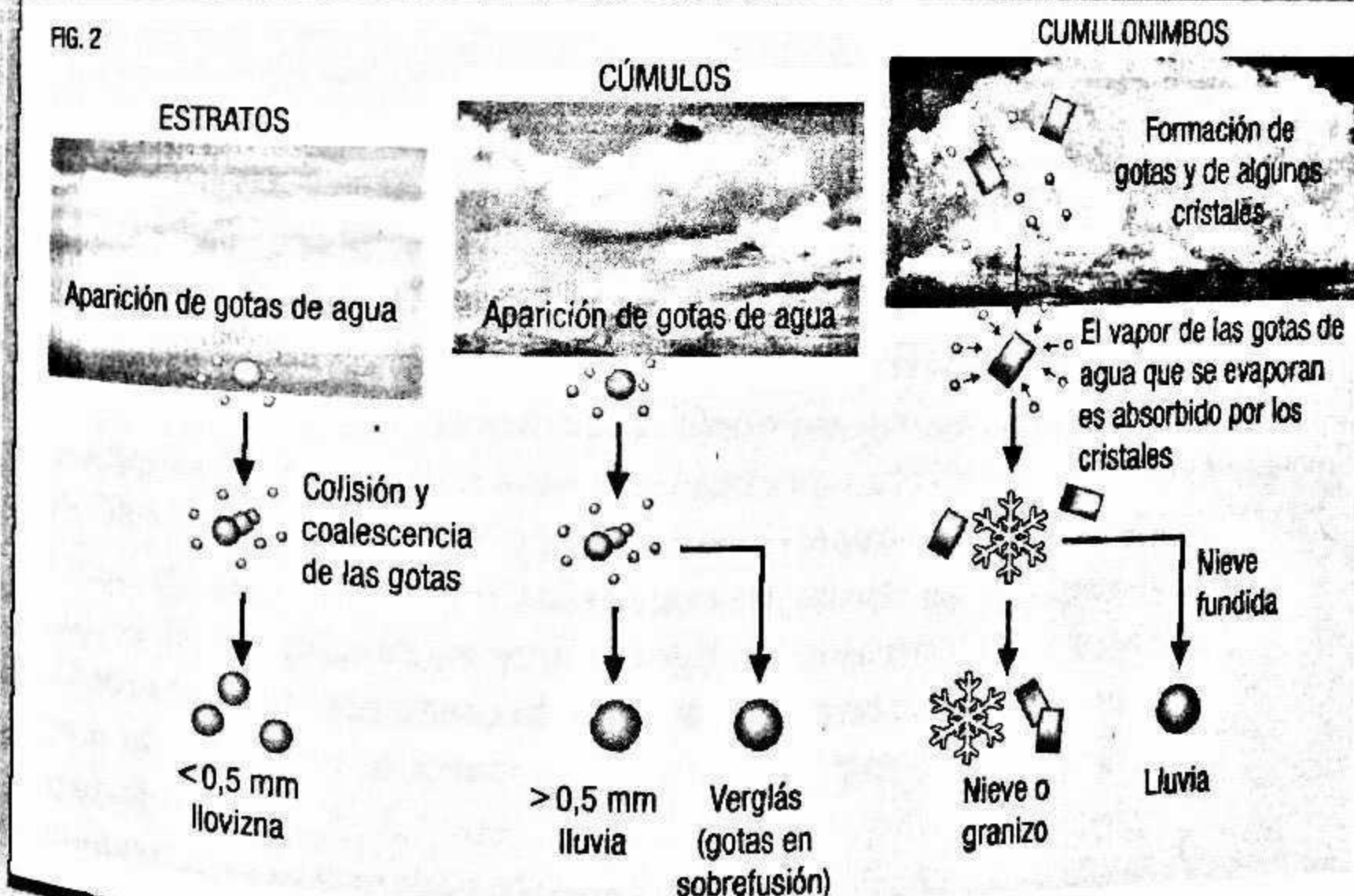
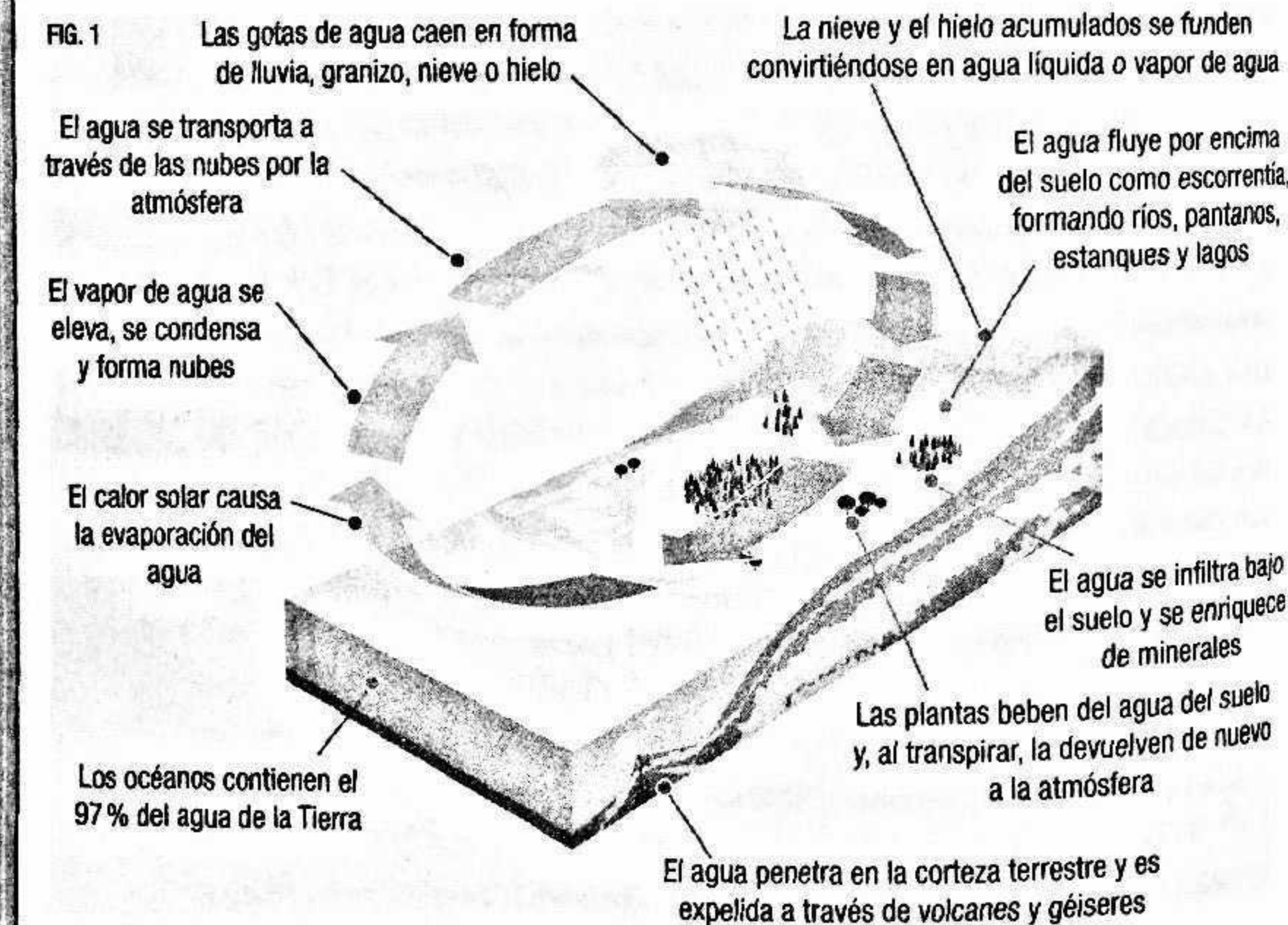
NUBES Y PRECIPITACIONES: EL CICLO DEL AGUA

Las masas de aire que componen la atmósfera acarrean vapor de agua (ver figura 1 del ciclo hidrológico bajo estas líneas), que proviene de la evaporación del agua de mar y de la humedad terrestre. El vapor de agua es transparente a la radiación solar, con lo que no resulta visible. Cuando, por algún motivo, se produce un enfriamiento repentino de la masa de aire, el vapor de agua puede condensar en forma de minúsculas gotitas o, si la temperatura es inferior a 0°C , en cristales de hielo. En este estado, el agua deja de ser translúcida y se hace opaca, transformándose en nubes. El enfriamiento puede ocurrir por varios motivos. Uno es cuando el aire recoge más vapor al pasar por encima de un lago o mar; otro, al entrar en contacto con una superficie a baja temperatura (por ejemplo, una masa fría oceánica al entrar en contacto con el continente); también sucede en el momento en el que se eleva al encontrar un obstáculo elevado, como una montaña; o cuando una masa de aire caliente, más ligera, colisiona y asciende sobre una masa de aire frío o si una masa de aire húmedo se ve sometida a un proceso de convección.

El tamaño de las gotas determina el tipo de precipitación

Las microgotas (o microcristales), cuyo tamaño medio es del orden de $0,02\text{ mm}$, son demasiado ligeras para caer pero, al aglomerarse progresivamente, pueden alcanzar un peso

crítico que supere la fuerza de las corrientes ascendentes, a partir del cual caen en forma de precipitación. El tipo de precipitación (llovizna, lluvia, nieve, granizo...) depende del tipo de nube en que se hayan formado (ver figura 2). Así, las lloviznas, compuestas por gotas muy pequeñas (menores de $0,5\text{ mm}$), se forman en nubes bajas (por debajo de los 2 km de altitud), conocidas como *estratos*, que están asociadas a frentes cálidos. Cuando el tamaño de las gotas es mayor de $0,5\text{ mm}$ se habla de lluvia o chubasco. Estas provienen de nubes a alturas intermedias (entre 2 y 6 km) con forma de algodón llamadas *cúmulos*, que suelen acompañar a los frentes fríos. Los cúmulos tienden a crecer verticalmente, alcanzando zonas más altas y, por tanto, más frías de la troposfera, formando los denominados *cumulonimbos*. Aquí tienen su origen las lluvias más intensas o tormentas, que suelen acarrear fuertes vientos, fenómenos eléctricos (relámpagos), nieve o granizo. Debido a su baja temperatura, en estas nubes el vapor se condensa en núcleos de hielo, a los que se va adheriendo progresivamente agua. Cuando la temperatura de la nube es inferior a 0°C , estos cristales de hielo forman estructuras regulares ramificadas, los *copos de nieve*. También existen tipos de nube que no acarrear lluvia como, por ejemplo, los *cirros*, nubes altas formadas por cristales de hielo y aspecto filamentosos. Aunque la Tierra es el único planeta del sistema solar con agua líquida en su superficie, la presencia de nubes es muy común en otros planetas en los que, además de las constituidas por vapor de agua, están las que se forman con otros gases, como el dióxido de carbono, el amoníaco o el metano.



la radiación solar incide más oblicuamente. Sin embargo, si el clima terrestre dependiera únicamente de la circulación global atmosférica, este sería igual para todos los puntos situados a la misma latitud, lo que no es, obviamente, el caso. Por ejemplo, Chicago y Roma se encuentran a latitudes similares pero la primera experimenta inviernos mucho más rigurosos, con temperaturas que pueden rondar los -20°C y copiosas nevadas. Eso es porque existen otros factores que afectan al clima de un determinado punto de la Tierra.

Uno de ellos es la altitud. Como ya hemos visto, la temperatura de la atmósfera desciende gradualmente con la altura, haciendo que el clima de las regiones montañosas sea más frío que el de regiones a nivel del mar.

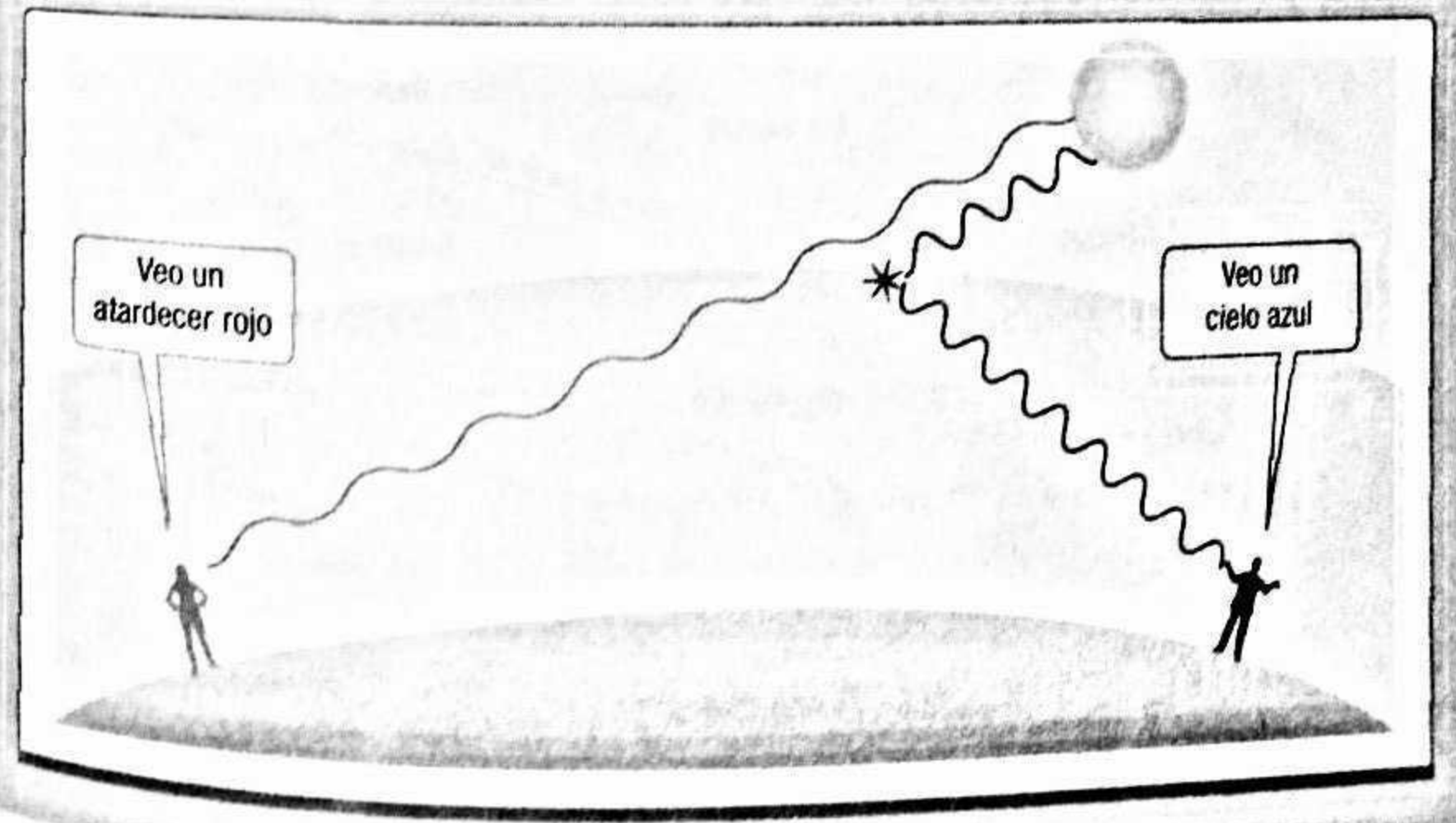
Otro factor muy importante es la presencia de grandes masas de agua. Casi $3/4$ partes de la superficie terrestre está cubierta de agua. La mayor parte de la radiación solar es, de hecho, absorbida por los océanos, principalmente en las zonas tropicales. Además de almacenar grandes cantidades de calor, estas masas de agua ayudan a distribuirlo a lo largo del globo. Por un lado, debido a la evaporación, la temperatura y humedad del aire aumentan, siendo este aire arrastrado de unas regiones a otras por los vientos alisios, hasta que se enfría, dando lugar a precipitaciones. Por otro lado, los océanos, al igual que la atmósfera, poseen un complejo sistema de circulación en forma de corrientes. Aquí también se hace patente el efecto Coriolis, que, recordemos, provoca que estas corrientes circulen en sentido horario en el hemisferio norte, y antihorario en el hemisferio sur. Estas corrientes transportan las aguas cálidas y la precipitación desde las zonas ecuatoriales a las polares, regresando de nuevo al ecuador en forma de corrientes más frías. Una de las más célebres es la corriente del golfo, que se origina en el golfo de México y que, tras bordear parte de la costa este de Estados Unidos, atraviesa el Atlántico y llega a Europa, asegurando a este continente un clima más templado del que le correspondería por su latitud. De esta manera, las corrientes marinas y oceánicas actúan como agente regulador de la temperatura, transfiriendo el calor del ecuador a las zonas de mayor latitud.

¿DE QUÉ COLOR ES EL CIELO?

La luz del Sol nos llega en todo el rango de longitudes de onda, si bien su intensidad es máxima en la zona del espectro visible. Aquí, cuando todos los colores se superponen conforman un color casi blanco. La presencia de esas tonalidades se hace patente en los arcoíris, un fenómeno que se produce cuando la luz solar, tras atravesar las gotas de agua, se separa en sus diferentes colores. Para llegar hasta nosotros, la luz solar debe atravesar la atmósfera, chocando con las moléculas del aire, principalmente oxígeno y nitrógeno. Algunas longitudes de onda son absorbidas por estas moléculas (es el caso de la radiación ultravioleta, absorbida por el ozono). Otras experimentan rebotes sucesivos (se dispersan), pudiendo escapar de nuevo al espacio o bien llegar hasta la superficie. No todas las ondas son dispersadas con igual efectividad. Las longitudes de onda más cortas (colores azulados), especialmente aquellas de un tamaño comparable al de las moléculas del aire, lo hacen con mayor probabilidad.

Azul durante el día, rojizo en la salida y puesta del Sol

Es el caso de la radiación azul, que es eficientemente desviada por las moléculas de oxígeno y nitrógeno. Estos rebotes confieren al cielo diurno su característico color azulado. Esta tonalidad es incluso visible a grandes distancias en el espacio exterior, como quedó patente en la fotografía tomada en 1990 por la sonda Voyager desde los confines del sistema solar, en la que la Tierra aparecía como «un punto azul pálido», como la describió el popular científico Carl Sagan (1934-1996). Durante el amanecer o en el crepúsculo, la radiación solar nos llega de forma más oblicua, como ejemplifica la figura, y debe atravesar una mayor cantidad de atmósfera. Cuando llega al observador, la mayor parte de las ondas violetas y azules se habrán dispersado, restando apenas los tonos rojizos, lo que confiere a los atardeceres su característica tonalidad.

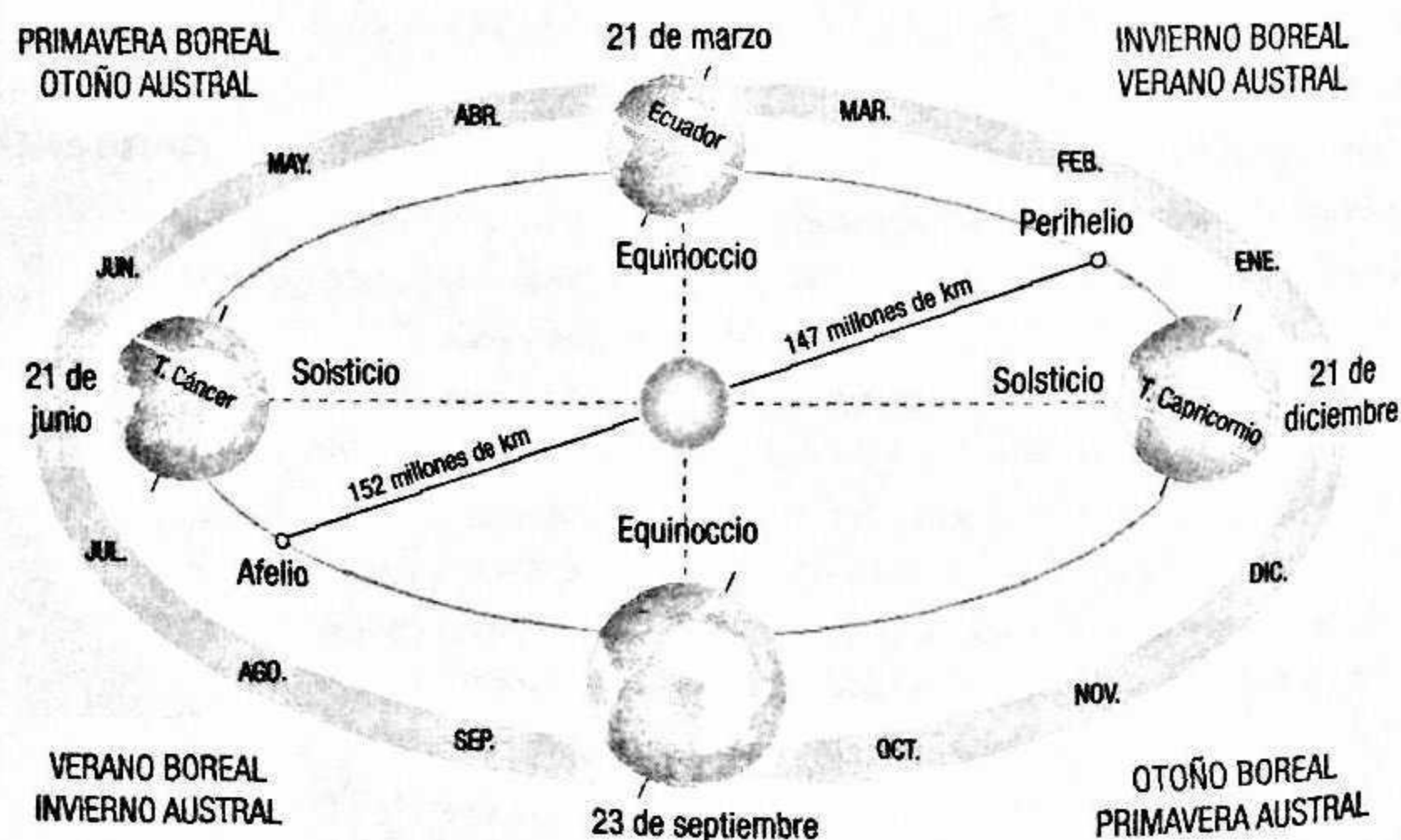


La inclinación del eje de rotación terrestre, origen de las estaciones del año

Además de su movimiento de rotación, que determina las alternancias entre día y noche, la Tierra gira alrededor del Sol, invirtiendo en cada revolución (o giro completo) 365 días, 6 horas y 9 minutos. Este movimiento de traslación tiene lugar en una órbita con forma elíptica, en la que el Sol ocupa uno de sus focos. Esto significa que la distancia de la Tierra al Sol no es constante. En su punto más lejano (afelio), que tiene lugar en torno al 4 de julio, la distancia entre ambos astros es de 152 millones de km, mientras que en el punto más cercano, allá por el 4 de diciembre (perihelio), la distancia se reduce a 147 millones de km. A pesar de esta variación, el clima terrestre no experimentaría grandes variaciones a lo largo del año de no ser porque el eje de rotación se encuentra inclinado con respecto a la perpendicular del plano de la órbita; concretamente, $23,27^\circ$ (ver figura 5). Durante el

verano boreal, la inclinación de la Tierra hace que los rayos incidan de forma más perpendicular sobre el hemisferio norte, con lo cual este se calienta más. Para sus habitantes, el Sol se eleva más sobre el horizonte. En invierno, por contra, la inclinación de la Tierra hace que los rayos del Sol incidan de forma más oblicua. Naturalmente, en el hemisferio sur la situación es la inversa, por lo que ambos experimentan las estaciones de forma alterna.

FIG. 5



La figura muestra cómo la inclinación de la Tierra respecto al Sol determina las distintas estaciones del año.

La astronomía moderna atribuye un origen común a los planetas y lunas de nuestro sistema solar. Este consistió en el colapso de una enorme masa de gas y polvo que erraba por uno de los brazos de nuestra galaxia, la Vía Láctea, seguramente procedente de la explosión de una estrella anterior. La nebulosa en cuestión estaba compuesta principalmente por hidrógeno y helio (por cada tonelada, aproximadamente 984 kg consistirían en estos dos elementos), seguido de varios tipos de hielo (agua, metano, amoníaco...) y, finalmente, polvo y granos de material rocoso y metales. En una región de esta nube se acumuló, por colapso gravitacional, una mayor masa de gas, dando lugar a un «protosol», en torno al cual quedaría el resto de la nube girando en forma de disco. De este material «sobrante» se formaron los planetas y sus lunas. También los cometas que, con sus alargadas órbitas, visitan de forma periódica nuestro sistema, procederían de la misma nube. Cuando el protosol alcanzó la masa suficiente, comenzaron a desencadenarse reacciones nucleares en su interior, proporcionando luz y calor al resto de la nebulosa.

En la zona más cercana al Sol, se formaron planetas relativamente pequeños y rocosos (Mercurio, Venus, la Tierra, Marte),

conocidos como *planetas interiores* o terrestres, mientras que a distancias mayores se formó un segundo grupo, los *planetas exteriores*, de mayor tamaño y naturaleza gaseosa (Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno). Las notables diferencias entre ambos son una consecuencia directa de las condiciones en las que se formaron. El origen de los planetas interiores tuvo lugar en la zona próxima al protosol. Debido al calor generado por este, el hielo se evaporó, mientras que las partículas de polvo y roca fueron amalgamándose poco a poco, dando lugar a objetos de un tamaño de varios kilómetros, llamados *planetésimos*. La atracción gravitatoria entre ellos debió favorecer su acercamiento, fusionándose ocasionalmente para dar objetos mayores llamados *protoplanetas*. Este proceso se extendió durante varios cientos de millones de años hasta que el número de cuerpos quedó reducido a los cuatro planetas interiores: Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. La mayor parte del material gaseoso fue arrastrada por el viento solar producido por la actividad de aquel Sol incipiente y, por ello, los planetas resultantes tienen una composición fundamentalmente rocosa.

También el clima de cada uno de ellos depende en buena medida de su distancia al Sol. A menor distancia, mayor cantidad de radiación recibirá y, en principio, más cálido será el planeta. Pero, como ya hemos visto al comparar el sistema Tierra-Luna, otro factor muy importante es la presencia o no de atmósfera. Es imprescindible comprender la estructura y composición de las atmósferas planetarias para llegar a entender su clima.

Veamos qué sucede al respecto de los planetas interiores. Mientras que Mercurio merece mención aparte, precisamente porque carece de una verdadera atmósfera, los otros tres, Marte, Venus y la Tierra, poseen atmósferas muy distintas. Una primera diferencia es la cantidad de gas que contienen. La atmósfera de Venus posee 100 veces más gas que la de la Tierra, que a su vez contiene 100 veces más gas que la de Marte. Otra diferencia radica en su composición (ver tabla). Las tres atmósferas están constituidas esencialmente por los mismos gases, dióxido de carbono (CO_2), oxígeno molecular (O_2) y nitrógeno molecular (N_2), lo que es acorde con el origen común de los

	Venus	Tierra	Marte
Dióxido de carbono (CO_2)	96,5 %	0,03 %	95,3 %
Nitrógeno (N_2)	3,5 %	78 %	2,7 %
Oxígeno (O_2)	trazas	21 %	0,13 %
Argón (Ar)	0,007 %	0,9 %	1,6 %
Metano (CH_4)	0	0,002 %	0

tres planetas. Pero la abundancia relativa de estos gases en la Tierra es muy diferente a la de sus vecinos. Las atmósferas de Venus y Marte están formadas casi íntegramente por CO_2 , mientras que en nuestro planeta este gas representa apenas el 0,03 %. Nuestra atmósfera está formada mayoritariamente por nitrógeno y oxígeno (en proporción de 4 a 1), pero estos dos gases aparecen en cantidades muy pequeñas en las atmósferas venusiana y marciana. ¿Por qué la Tierra, cuya órbita se sitúa entre las de Venus y Marte, tiene una atmósfera tan diferente a la de los otros dos?

La pequeña proporción de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera terrestre se puede explicar si tenemos en cuenta que este se disuelve de manera muy eficiente en nuestros océanos, en cuyos lechos termina precipitando en forma de rocas carbonatadas, como la caliza, o siendo usado por numerosos organismos para construir sus esqueletos o conchas. Si tenemos en cuenta todo este CO_2 , llegamos a una cantidad comparable a la de la atmósfera de Venus. Esta explicación nos lleva sin embargo a nuevas preguntas. ¿Por qué Venus y Marte carecen de tales océanos? En el caso de Marte, suponiendo que partió de cantidades similares de CO_2 que Venus y la Tierra, ¿a dónde fue a parar ese elemento?

Claramente, como veremos más adelante, hubo un momento en el pasado de estos planetas en el que sus destinos se separaron, proporcionando características diferenciadas a cada uno de ellos. Centrémonos ahora en su estado y clima actual.

MERCURIO: DÍAS ABRASADORES Y NOCHES GÉLIDAS

En 2006, la Unión Astronómica Internacional decidió redefinir el concepto de planeta, relegando a Plutón a la categoría de «planeta enano» y reduciendo, por tanto,

el número de planetas de nuestro sistema solar a ocho. Desde entonces, Mercurio (ver detalle del planeta en la fotografía superior de la página 51), con un tamaño algo mayor que el de nuestra Luna, pasó a ser el menor

En Mercurio el cielo es negro, sin la menor posibilidad de que amanezca; una noche eterna.

CARL SAGAN

de ellos, además del más cercano al Sol. Si redujéramos la escala del sistema solar haciendo que la distancia Tierra-Sol fuera de un metro, la órbita de Mercurio estaría a unos 39 cm del Sol.

Mercurio es el más veloz de los planetas. Invierte apenas 88 días en darle una vuelta al Sol, y lo hace a la nada despreciable velocidad de 50 km por segundo. En cambio, rota muy lentamente sobre sí mismo: cada día de Mercurio equivale a 59 días terrestres. Esta peculiaridad, además de dar lugar a días y noches larguísimos para nuestros estándares terrestres, también produce un curioso efecto. Si nos situáramos sobre la superficie del planeta en el perihelio, la época del año en la que Mercurio se encuentra más próximo al Sol, veríamos salir el astro rey por el este y ponerse por el oeste, como en la Tierra. Pero en un cierto punto de su recorrido por el cielo, el Sol se detendría y comenzaría a moverse en sentido contrario, hacia el este, durante el equivalente a varios días terrestres. Si el paso por el perihelio ocurriera durante una puesta de Sol, veríamos entonces a la gran estrella ocultarse para elevarse de nuevo sobre el horizonte, permaneciendo visible uno o dos días terrestres más, hasta volver a perderse por el horizonte.

Sin duda sería un espectáculo único, que haría las delicias de los hipotéticos turistas espaciales del futuro, de no ser porque estos deberían enfrentarse a las temperaturas más extremas del sistema solar. Durante el día, tendrían que soportar temperaturas de hasta 430 °C, mientras que por la noche la temperatura se puede desplomar hasta los -180 °C. Estas variaciones extremas

se deben a que Mercurio no tiene atmósfera, lo que nos lleva a comprobar la gran importancia que esta ha tenido para hacer de nuestro planeta un mundo habitable.

Hasta la década de 1970 nuestro conocimiento de Mercurio era muy limitado ya que su pequeño tamaño y su proximidad al Sol dificultan su observación con telescopios terrestres. La situación cambió en 1974, cuando la sonda estadounidense Mariner 10 consiguió sobrevolarlo, fotografiando buena parte de su superficie y analizando su posible atmósfera. La sonda detectó una tenue envoltura gaseosa, rica en una gran variedad de elementos, entre otros, hidrógeno, helio y oxígeno, pero que aparecían en cantidades ínfimas. Esto es debido a la poca intensidad de la gravedad del planeta, que hace que las partículas escapen con relativa facilidad al espacio, arrastradas por el propio viento solar.

Al carecer de atmósfera, no existe el efecto de dispersión que le da el característico color azul al cielo terrestre. La luz del Sol llega directamente a la superficie, sin ser desviada ni absorbida. Al mirar en la dirección del Sol (lo cual no es muy recomendable) veríamos un disco solar mucho mayor al que estamos acostumbrados en la Tierra, debido a su mayor cercanía, mientras que, en cualquier otra dirección, veríamos el cielo completamente negro, salpicado apenas por las estrellas, como en una noche perpetua.

VENUS, EL INVERNADERO DEL SISTEMA SOLAR

A primera vista, Venus parece un planeta gemelo al nuestro. Tiene casi la misma masa, el mismo diámetro y la misma densidad promedio que la Tierra y su gravedad es apenas un 10% menor. Sin embargo, su mayor cercanía al Sol tuvo consecuencias dramáticas para su clima, transformando lo que hubiera podido ser un planeta habitable en un mundo decididamente hostil. Venus es un infierno con temperaturas en su superficie abrasadoras, y una atmósfera aplastante y corrosiva. Pero no terminan aquí las diferencias entre ambos planetas. El año venusiano es algo más corto que el terrestre, como corresponde a un planeta más interior, empleando 225 días en dar una vuelta

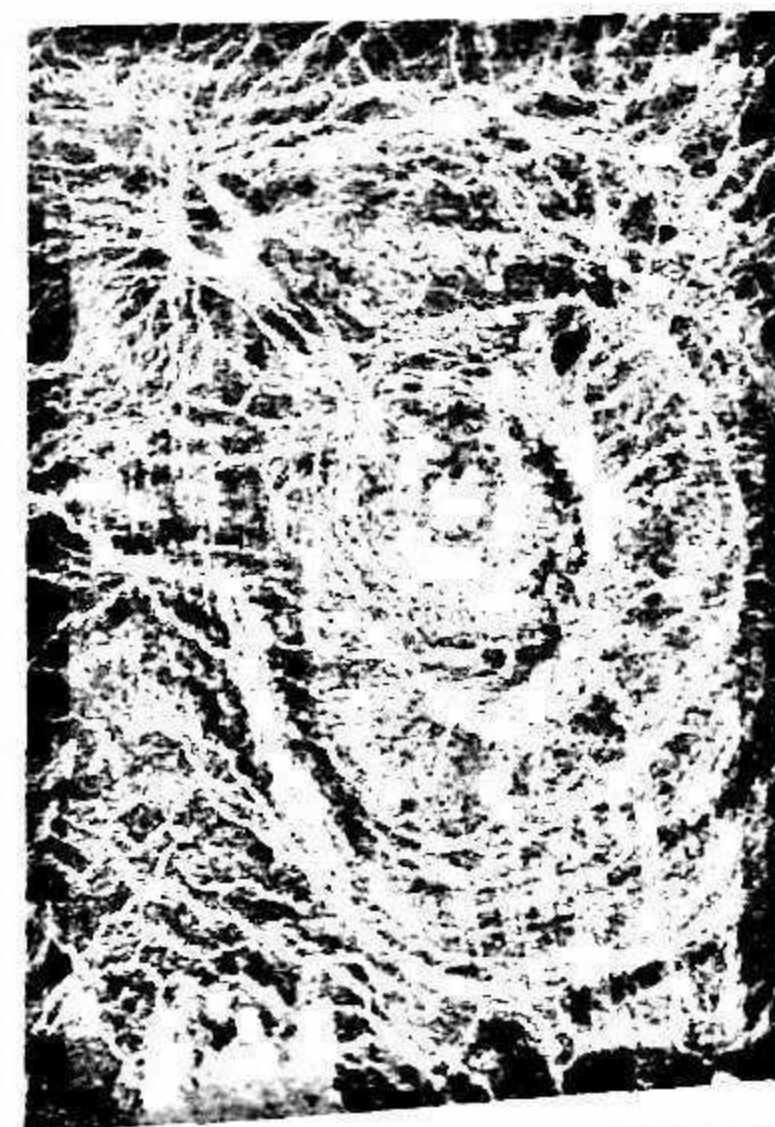
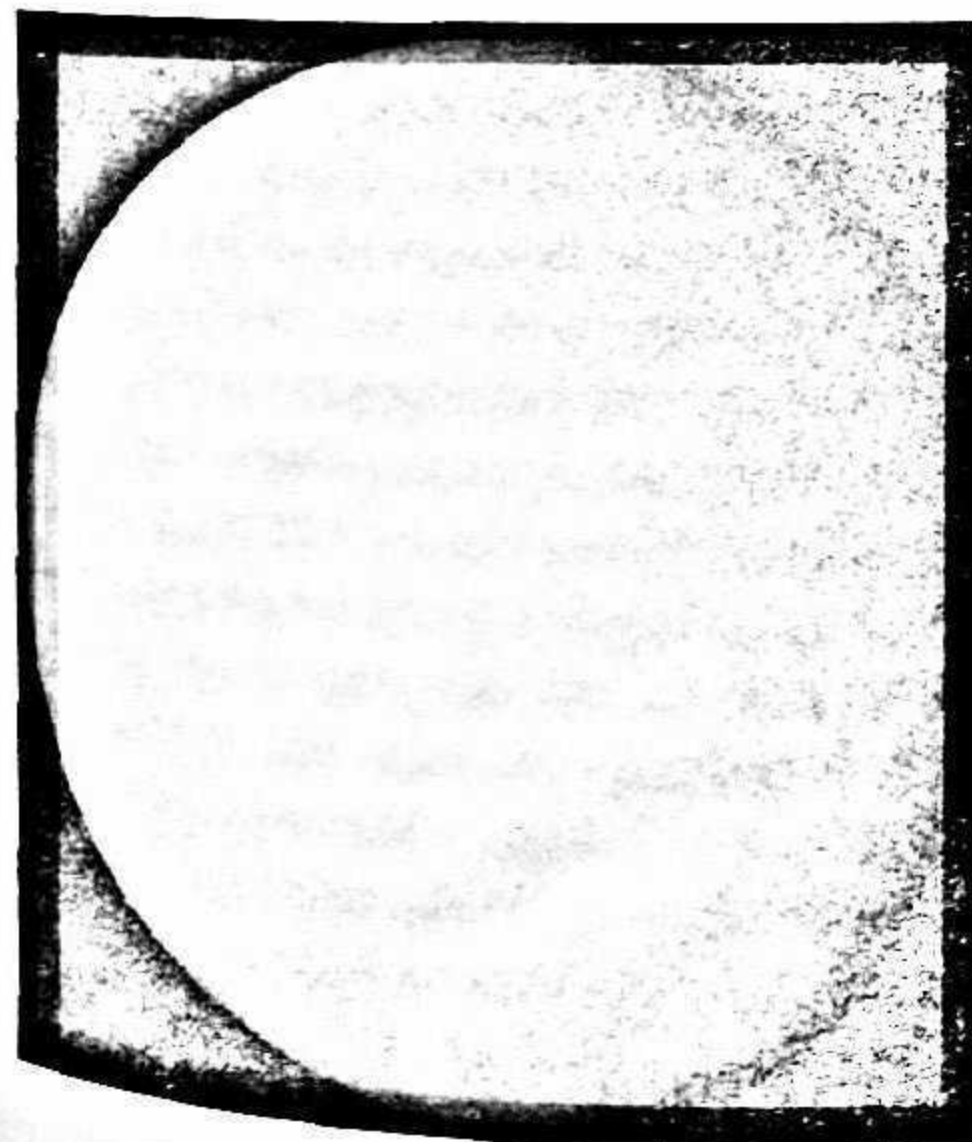
completa al Sol; en cambio, gira muy lentamente sobre sí mismo, invirtiendo 243 días terrestres en cada rotación. Por tanto, sus días son más largos que sus años. Además, rota en sentido contrario al de la mayoría de los planetas y lunas (solo Urano comparte esta propiedad). Un hipotético habitante venusiano vería salir el Sol por el oeste y perderse por el este.

Desde la Tierra, Venus (en las imágenes inferiores de la página contigua, detalle del planeta y de su superficie) es visible al amanecer (por eso es llamado «el lucero del alba») o al atardecer (en ese caso, «estrella vespertina» o «lucero de la tarde»), superando su brillo al de cualquier otro astro, con excepción, naturalmente, del Sol y de la Luna, que refulge con su brillo. Visto a través del telescopio, Venus presenta un uniforme y reluciente color perla. Su intenso brillo se debe a que refleja la mayor parte de la luz que recibe del Sol, absorbiendo apenas un 24% de la misma, siendo el 76% restante reflejado al exterior (su albedo es por tanto 0,76). Pero, incluso con un potente telescopio, es imposible apreciar ningún detalle de su superficie; Venus guarda celosamente los secretos de su fisonomía tras un grueso manto nuboso. Esto desató la imaginación tanto de científicos como de escritores. Entre ellos, la del eminente físico-químico y premio Nobel sueco Svante August Arrhenius (1859-1927), que imaginó la superficie venusiana como un frondoso vergel rico en agua.

Sin embargo, esta imagen se desvaneció tan pronto como se realizaron las primeras mediciones de la temperatura de ese planeta. Las primeras medidas de este tipo se hicieron mediante el análisis de la radiación que nos llega desde el mismo. Recordemos que todo cuerpo, por el hecho de estar a una cierta temperatura, emite radiación en forma de ondas electromagnéticas en todo el rango de longitudes de onda (o de frecuencias). De acuerdo con la ley de Wien, la longitud de onda dominante es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del objeto. Para las temperaturas típicas de un planeta, esta longitud de onda dominante se halla en la zona infrarroja del espectro. Cuando los científicos aplicaron en la década de 1950 esta técnica a la radiación que nos llega de Venus, obtuvieron una temperatura de tan solo 235 K (-38 °C). Sin embargo, tal y como ocurre en la



A la izquierda, una fotografía de Mercurio tomada por la sonda Messenger en 2008. Debajo, una imagen del planeta Venus tomada por la sonda Mariner 10 (izquierda) y un detalle de la superficie venusiana captado por la sonda Magallanes (derecha).



Tierra, se sabía que la espesa atmósfera de Venus bloquearía la radiación infrarroja procedente de la superficie, con lo que la temperatura medida correspondía realmente a las zonas altas de la atmósfera. En cambio, si la atmósfera de Venus se comporta como la de la Tierra frente al paso de radiación, sí sería transparente a las ondas de radio, de longitud de onda mayor que la de la radiación infrarroja. En este caso, el análisis teórico es algo más complejo que el proporcionado por la ley de Wien, pero la idea subyacente es la misma; a mayor temperatura, el espectro de emisión se desplaza a longitudes de onda menores (mayores frecuencias). El análisis arrojó una temperatura en superficie de Venus en torno a 330 °C. Nada más y nada menos que la temperatura de fusión del plomo.

Los resultados fueron acogidos con escepticismo entre la comunidad científica, hasta que soviéticos y estadounidenses se lanzaron a una carrera para liderar la «conquista» del planeta, enviando vehículos no tripulados a tomar datos *in situ*. Los primeros lo hicieron con el programa Venera (del ruso *Behepa*, que significa Venus), que se proponía enviar una sonda capaz de atravesar la atmósfera del planeta y posarse sobre su superficie. El proyecto estadounidense era menos ambicioso; pretendía enviar una sonda, la Mariner 1, para que se aproximara al planeta, hiciera fotos y tomara diversas medidas a distancia, pero sin llegar a entrar en contacto con él. El primer intento de cada «bando» terminó en fracaso, pero en 1963, la sonda estadounidense Mariner 2 consiguió sobrevolar el planeta y efectuar medidas de su temperatura, y alguna imagen. Estas medidas confirmaron las ya realizadas desde la Tierra, es decir, unas nubes muy frías sobre una superficie extremadamente caliente, a unos 425 °C.

Los soviéticos, por su parte, volvieron a fracasar en su segunda misión, la Venera 2, pero, por fin, el 1 de marzo de 1966 la sonda Venera 3 se posó o, mejor dicho, impactó sobre la superficie de Venus. Unos momentos antes, la sonda perdió la comunicación, probablemente aplastada por la elevadísima presión atmosférica. A pesar del accidentado contacto, la sonda ostenta el honor de ser el primer ingenio humano que ha alcanzado la superficie de otro planeta. En 1967, la Venera 4, en su hora y media

de descenso hasta la superficie venusiana, realizó medidas de su atmósfera, tales como su composición química, su temperatura o su presión, hasta quedar aplastada por la enorme presión atmosférica. Los datos recogidos durante su descenso revelaron una gran cantidad de CO₂, mucho mayor de la que se suponía.

Los soviéticos aprendieron la lección y, en misiones sucesivas, reforzaron fuertemente sus son-

das. Así, en 1970, Venera 7 consiguió posarse y resistir durante 23 minutos sobre la superficie, durante los cuales pudo enviar datos a la Tierra, siendo la primera sonda que realizó un verdadero aterrizaje sobre otro planeta. Registró una temperatura de 475 °C y una presión de 90 atmósferas en superficie, comparable a la presión a una profundidad de 900 metros bajo el océano. Las siguientes sondas Ve-

nera sobrevivieron más tiempo y consiguieron además tomar las primeras fotografías de la superficie del planeta. La primera fotografía a color del planeta (ver imagen superior en la página 59), obtenida por Venera 13 en marzo de 1982, mostró un paisaje infernal, de una tonalidad amarillenta-verdosa, con una superficie árida y fracturada, consecuencia de las elevadas temperaturas o de su origen volcánico.

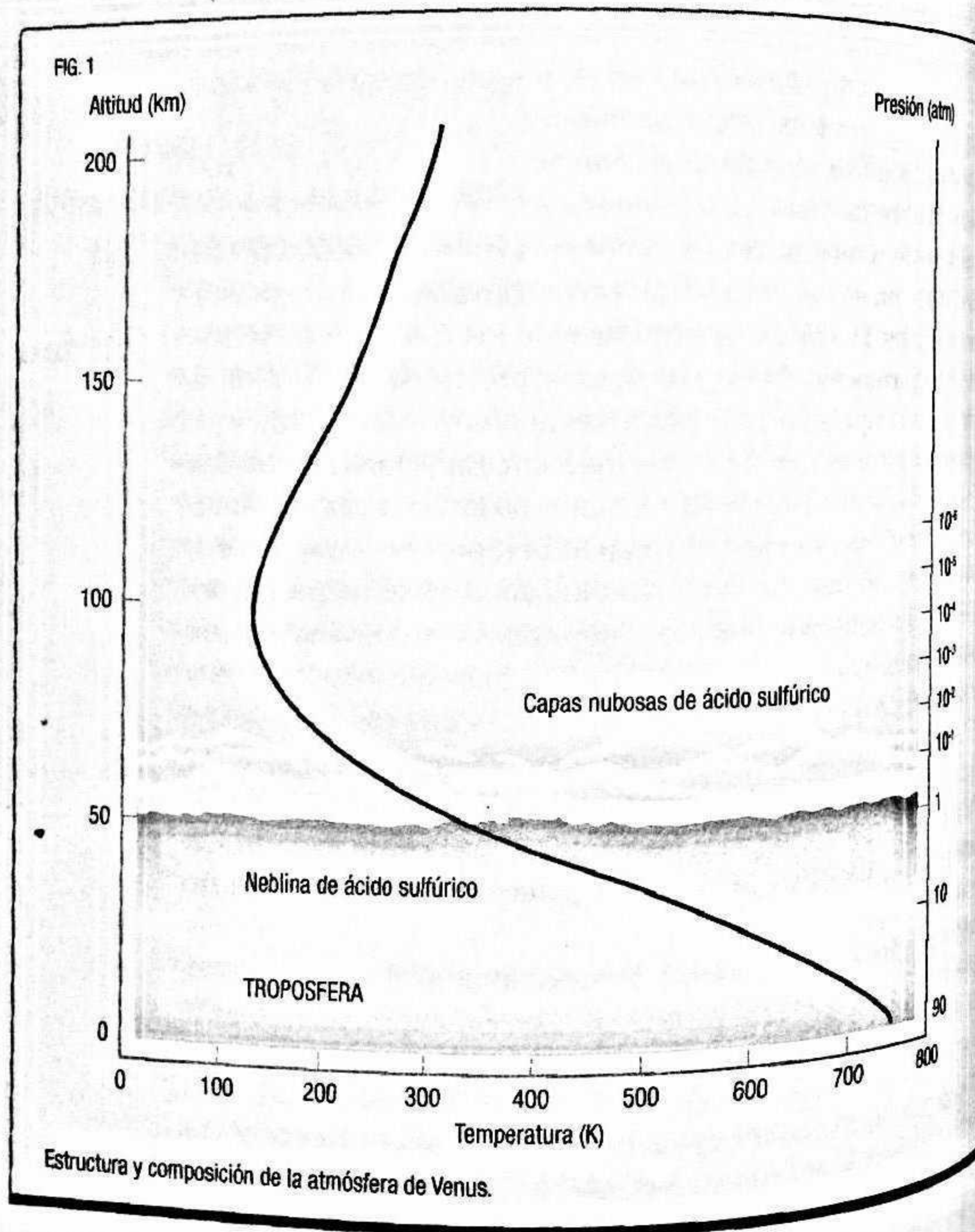
A estas pioneras misiones les han sucedido muchas otras hasta nuestros días. Por ejemplo, en 2006 la Agencia Espacial Europea (ESA) se unía al dúo estadounidense-soviético, con la misión Venus Express. La sonda permaneció orbitando en torno al planeta hasta 2014. Además, a las sondas enviadas específicamente a estudiar el planeta Venus hay que añadir otras que, en su camino a otros planetas más lejanos, han sobrevolado el planeta para aprovechar su impulso gravitatorio y, de paso, tomar fotografías y medidas de su atmósfera. Entre estas, la sonda Galileo (en 1990) en su viaje a Júpiter, o la Cassini-Huygens (en 1998 y 1999) en su camino a Saturno, de las que hablaremos más adelante.

Déjenme en cualquier planeta del sistema solar, déjenme —sin poder sentir su gravedad ni ver su suelo— echar una rápida mirada a su Sol y a su cielo, y muy probablemente podré decirles dónde estoy.

CARL SAGAN

La atmósfera de Venus

El análisis de los datos recogidos a lo largo de todos estos años de exploración venusiana nos ha permitido hacernos una idea bastante detallada de la composición de su atmósfera (figura 1) y de su clima en general. Como ya se mencionó, la temperatura desciende bruscamente con la altitud, pasando de los casi 500 °C



sobre la superficie, a una temperatura mínima en torno a -113 °C, para una altitud de unos 100 km. Esta variación tan abrupta en altura provoca vientos huracanados en la parte superior de la atmósfera de hasta 100-200 m/s. Este curioso fenómeno, conocido como *superrotación*, hace que la parte superior de la atmósfera gire rápidamente sobre el planeta, dándole la vuelta cada cuatro días. Esto resulta aún más llamativo si lo comparamos con la parsimoniosa rotación de este planeta sobre sí mismo que, recordemos, invierte 243 días terrestres en cada giro.

Por analogía con el caso terrestre, los planetólogos dividen las atmósferas de otros planetas en diferentes regiones o capas verticales. La parte más baja, en contacto con la superficie, recibe el nombre de *troposfera*. La temperatura va descendiendo gradualmente a medida que ascendemos en la troposfera hasta estabilizarse en su parte superior. En la Tierra, esto ocurre a una altura de unos 11 km. La mayor parte de los fenómenos meteorológicos (formación de nubes, vientos, precipitaciones) tienen lugar en esta capa y la mayoría de las nubes que observamos se encuentra a alturas por debajo de los 8 km. En Venus la troposfera se extiende hasta mayor altitud, unos 60 km. Al igual que en la Tierra, también en Venus se forman nubes, pero poco tienen que ver con las nuestras. Para empezar, lo hacen a una altura mucho mayor, extendiéndose entre los 45 y los 70 km de altura. Esta gruesa capa nubosa, con sus más de 25 km de espesor, es la responsable de la opacidad del planeta Venus que se aprecia desde la Tierra. También sus nubes son muy distintas a las terrestres. La cantidad de vapor de agua es muy pequeña y por ello las nubes venusianas están constituidas por ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y se forman en la parte superior de la troposfera, donde la temperatura es de unos 10 °C. Estas nubes sulfurosas dan lugar a un curioso fenómeno. Las gotas de ácido sulfúrico que las componen caen en forma de lluvia, pero nunca llegan a alcanzar la superficie del planeta ya que, al ir descendiendo, la temperatura del gas circundante va siendo cada vez mayor (por ejemplo, a una altitud de 45 km la temperatura es ya de 100 °C). Esto hace que el ácido sulfúrico se descomponga en vapor de agua y SO_2 , evaporándose y volviendo a ascender.

Por debajo de esa capa nubosa, se halla una neblina de compuestos de azufre pero, a altitudes inferiores a los 30 km, la atmósfera se muestra sorprendentemente despejada y transparente. Sin embargo, debido a la elevada presión y densidad, el entorno se ve distorsionado, como si miráramos a través de un trozo de vidrio o bajo el agua en el interior de una piscina.

El efecto invernadero descontrolado

¿A qué se debe el clima abrasador de Venus? La respuesta está precisamente en su atmósfera. Al ser su órbita algo más pequeña que la de la Tierra, recibe más luz solar por unidad de área. Hace 4000 millones de años, esto no suponía un grave problema para el clima de Venus, ya que el Sol brillaba un 25% menos que en la actualidad. La órbita de Venus se encontraba dentro la llamada *zona de habitabilidad*, el rango de distancias al Sol que permite la existencia de agua líquida. Para distancias menores, el agua herviría y para distancias mayores, estaría congelada. Venus se encontraría a una distancia intermedia y, por tanto, es plausible que contuviera agua en estado líquido e incluso océanos.

A medida que el brillo solar fue aumentando, la zona de habitabilidad fue alejándose del Sol, hasta situarse más allá de la órbita de Venus. Durante este periodo de transición, su clima debió cambiar de forma dramática. Parte del agua de su superficie se evaporaría, aumentando notablemente la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. El vapor de agua actúa como gas de efecto invernadero, con lo que su presencia en la atmósfera ayudaría a «atrapar» más calor, contribuyendo a aumentar aún más la temperatura del planeta, y propiciando una mayor evaporación. Este fenómeno en cadena, que ha marcado hasta hoy el clima de Venus, fue sugerido en 1969 por el planetólogo estadounidense Andrew Ingersoll (n. 1940) en un estudio titulado «El efecto invernadero descontrolado: una historia del agua en Venus». Según el modelo matemático desarrollado por Ingersoll, si sacáramos a la Tierra de su órbita y la colocáramos en la de Venus, se desencadenaría también este «efecto invernadero des-

controlado», con las consecuencias devastadoras que el lector puede imaginar. Un resultado parecido tendría un aumento repentino de la luminosidad solar, que alejaría la zona de habitabilidad más allá de la órbita terrestre. Para nuestra tranquilidad, y aunque el Sol experimenta variaciones en su actividad, estas no son lo suficientemente acusadas como para desencadenar un efecto invernadero descontrolado.

Para hacernos una idea más cuantitativa del impacto que posee el efecto invernadero sobre el clima venusiano, podemos calcular, como ya hicimos en el caso de la Tierra y de la Luna, la temperatura de equilibrio de Venus en ausencia de atmósfera. Usando la distancia promedio Venus-Sol (0,723 UA), y su albedo ($\alpha=0,76$), obtenemos una temperatura de 230 K, es decir, -43°C . Los aproximadamente 500°C de diferencia con su temperatura real se deben en buena medida al efecto invernadero. Otra consecuencia de ese fenómeno es que el calor se reparte de manera casi uniforme por todo el planeta. A diferencia de la Tierra, las variaciones de temperatura con la latitud son mínimas, y la variación diurna es inferior a 1°C .

Queda una importante cuestión por resolver. Como vimos, el contenido de vapor de agua en la atmósfera actual de Venus es muy pequeño de manera que si grandes cantidades de agua se evaporaron, ¿dónde fue a parar toda esa agua? Según Ingersoll, lo que ocurrió fue que la radiación ultravioleta del Sol rompió dichas moléculas, disociándolas en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno, mucho más ligero, fue escapando poco a poco al espacio exterior mientras que el oxígeno permanece hoy día, formando compuestos como el ácido sulfúrico.

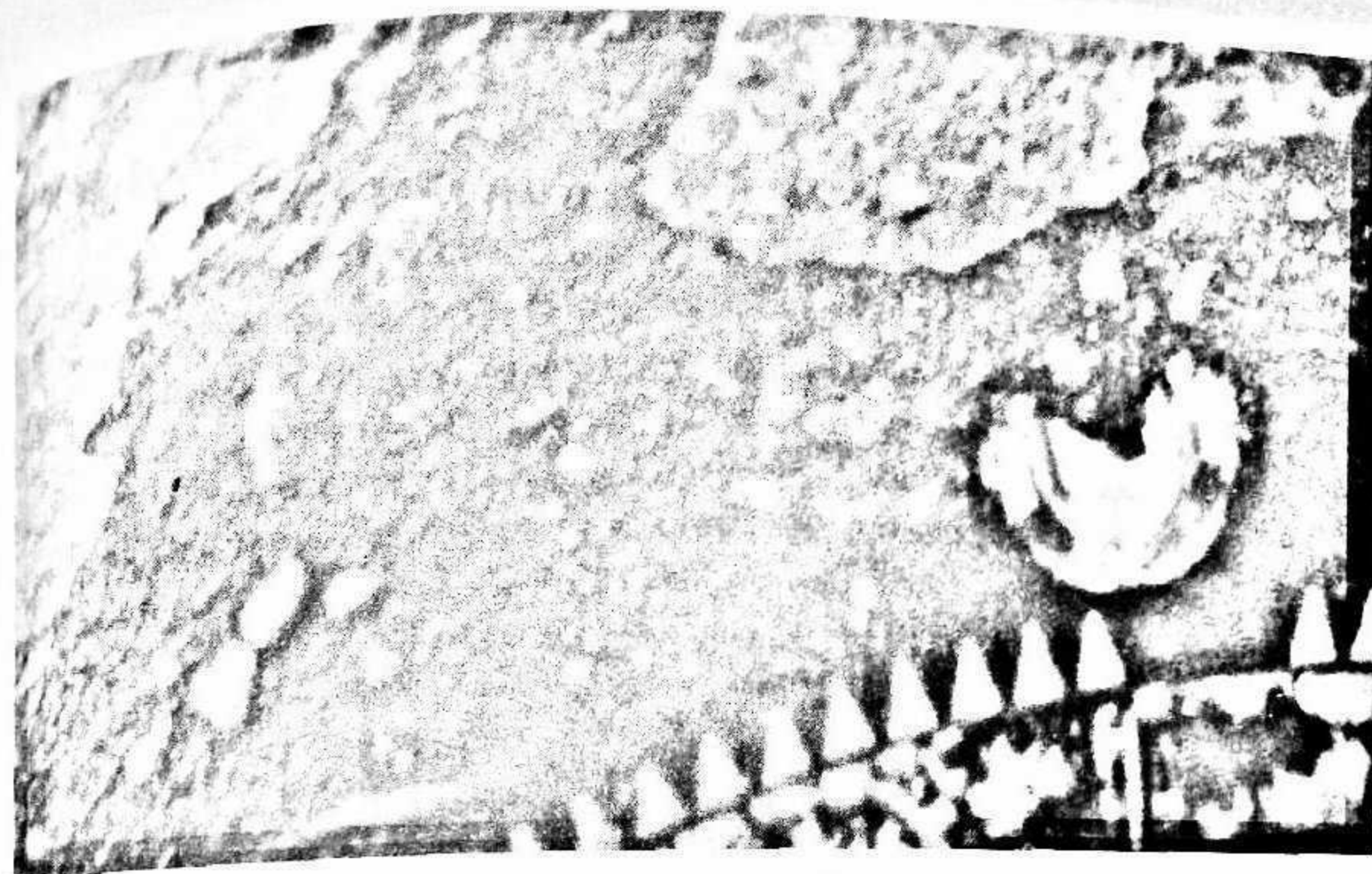
MARTE, EL FRÍO Y ÁRIDO PLANETA ROJO

Marte (ver imágenes inferiores de la página 59) es el cuarto planeta del sistema solar en cuanto a distancia al Sol, orbitando a una distancia media de 230 millones de kilómetros del mismo, aproximadamente una vez y media la distancia Tierra-Sol. Aunque su diámetro es la mitad que el de la Tierra, ambos plane-

tas guardan notables similitudes. Fácilmente reconocible en la bóveda celeste por su color rojo, no pasó inadvertido para las antiguas civilizaciones. Los griegos lo llamaron Ares, hijo de Zeus y Hera, mientras el nombre de Marte se debe a los belicosos romanos, que lo convirtieron en dios de la guerra, hijo de Júpiter y Juno.

Marte es el único planeta que permite ver los detalles de su superficie desde la Tierra. A diferencia de Venus, cuya perpetua capa de nubes impide distinguir el más mínimo detalle de su superficie, Marte posee una atmósfera mucho más tenue, más incluso que la de la Tierra. La primera persona que tuvo el privilegio de observar la superficie de Marte fue posiblemente el neerlandés Christiaan Huygens (1629-1695), valiéndose de un pequeño telescopio refractor de fabricación propia. Observando el movimiento de una región negruzca de la superficie (que hoy conocemos como Syrtis Major) a lo largo de los días, fue capaz de deducir que el periodo de rotación del planeta rojo es prácticamente igual al terrestre, de unas 24 horas. Apenas un lustro después, el astrónomo italiano Giovanni Cassini (1625-1712) descubrió la existencia de casquetes polares, que guardaban una sorprendente semejanza con los de la Tierra, si bien hubo que esperar más de un siglo hasta que William Herschel sugiriera que estos casquetes estaban constituidos por hielo.

No terminan ahí las semejanzas con la Tierra. El propio Herschel descubrió que el ángulo de inclinación del eje de rotación, la *oblicuidad*, es muy parecido al de nuestro planeta (aproximadamente 24°). Eso significa que Marte también posee estaciones, aunque como invierte casi dos años terrestres en dar la vuelta al Sol y su órbita es mucho más alargada que la nuestra, no todas las estaciones tienen la misma duración. La primavera es la más larga, dura siete meses, mientras que el verano y el otoño duran seis meses y el invierno tan solo cuatro. Al igual que ocurre en la Tierra, la fisonomía de la superficie marciana experimenta también cambios con las estaciones. Durante la primavera y verano de uno de sus hemisferios, el casquete polar se encoje y las zonas oscuras, que en ocasiones parecen verdosas, destacan más sobre el resto. En otoño



Arriba, primera fotografía (a color en el original) de la superficie Venus, realizada por la sonda Venera 13 tras su aterrizaje en 1982. Abajo izquierda, fotografía tomada por la sonda Viking 1 en 1976, donde se aprecia la delgada y tenue atmósfera marciana. Abajo derecha, fotografía de Marte tomada en 2007 por la sonda Rosetta de la ESA.

e invierno, los casquetes aumentan su tamaño y las regiones oscuras palidecen.

En 1877, el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli, aprovechando el momento de máximo acercamiento entre los dos planetas, lo que se denomina *oposición favorable*, identificó una serie de formaciones lineales en su superficie a las que bautizó como «canali», que se tradujo erróneamente al inglés como «canals» en lugar de «channels». La primera alude a una construcción artificial, mientras que la segunda se refiere a una formación natural del terreno. Parece ser que fue esta traducción errónea la que provocó que muchos vieran en los «canali» el resultado de una compleja obra de ingeniería de una avanzada civilización. Entre ellos, el adinerado hombre de negocios, astrónomo y escritor estadounidense Percival Lowell (1855-1916), quien llegó a construir un observatorio en Arizona dedicado principalmente al estudio de la superficie marciana, desde donde elaboró una auténtica cartografía, incluyendo más de 160 «canales». Pensó que estas estructuras servirían para canalizar y transportar el agua desde los polos, hasta las pocas zonas verdes esparcidas por el planeta. Lowell imaginó a Marte como un árido planeta en extinción cuyos habitantes luchaban por sobrevivir en tan hostiles condiciones. Sin duda, tarde o temprano sus desesperados pero avanzados habitantes abandonarían el planeta e invadirían nuestro paradisíaco planeta, repleto de recursos. Argumentos de este tipo pasaron a la cultura popular gracias a los libros del propio Lowell y de numerosos escritores de ciencia ficción.

Hasta mediados del siglo xx, se pensaba que la variación en la coloración del planeta era debida a los cambios estacionales de la vegetación. La situación cambió drásticamente en el verano de 1965 cuando, tras seis fracasados intentos estadounidenses y soviéticos, la sonda Mariner 4 de la NASA consiguió sobrevolar el planeta y enviar 21 fotografías en blanco y negro de su superficie, en las que, lejos de encontrar vestigio alguno de vegetación, descubrió una superficie árida y rocosa, y con numerosos cráteres. De existir vida en el planeta marciano, no sería desde luego en la forma en la que la habían imaginado Lowell y sus seguidores.

El clima de Marte es frío ¿como el de un invierno inglés?

En 1907, Percival Lowell estimó que la temperatura media de Marte era de unos 8 °C, lo cual permitiría la existencia de agua líquida en su superficie, que fluiría por sus «canales». Ese dato no resultaba plausible para otros científicos. Entre ellos, el naturalista británico Alfred Wallace (1823-1913), codescubridor de la teoría de la evolución junto con Darwin, y quien apuntó que esta temperatura era equiparable a la de un invierno en el sur de Inglaterra. ¿Cómo era posible que un planeta tan alejado del Sol pudiera gozar de un clima tan benigno?

Aunque el argumento dado por Wallace es válido, como ya sabemos no es la distancia al Sol el único factor que determina el clima de un planeta. En el caso de la Tierra y, de forma más dramática, de Venus, el efecto invernadero producido por los gases de la atmósfera puede contribuir a aumentar notablemente la temperatura del planeta. No es este el caso de Marte; aunque posee una atmósfera, esta es mucho más tenue que la de Venus e, incluso, que la de la Tierra (esto permitió de hecho a Schiaparelli y Lowell cartografiar la superficie marciana con telescopios terrestres).

Observando de nuevo la tabla (página 47), vemos que la atmósfera de Marte está compuesta casi en su totalidad por dióxido de carbono (95,3%), con pequeñas cantidades de nitrógeno (2,7%), argón (1,6%), agua, monóxido de carbono y oxígeno molecular (O₂). El CO₂, como sabemos, es un gas de efecto invernadero pero, en el caso de Marte, este forma una capa tan tenue que apenas afecta a la temperatura global del planeta. Las primeras sondas que consiguieron posarse sobre la superficie de Marte, las gemelas Viking 1 y 2, comprobaron que la atmósfera marciana es 100 veces menos densa que la terrestre, de manera que la cantidad neta de CO₂ en la atmósfera es muy baja, e insuficiente para producir un efecto invernadero apreciable.

Podemos convencernos de que es así recurriendo nuevamente a la fórmula para estimar la temperatura de equilibrio de la superficie de Marte, en ausencia de efecto invernadero. Como el albedo de Marte tiene el valor 0,250 y su distancia me-

dia al Sol es $d=1,52$ UA, resulta $T_{eq}=210$ K, equivalente a -63°C , a comparar con su temperatura media real, que es de unos -53°C . Como vemos, los dos valores son próximos entre sí, lo que constata que el efecto de la atmósfera en la temperatura del planeta debe ser pequeño.

En el caso de la Tierra, la atmósfera y los océanos actúan como agentes reguladores de la temperatura, atenuando las diferencias entre día y noche, y llevando además parte del calor de unas zonas a otras. En Marte, la ausencia de océanos y la menor densidad de su atmósfera hacen que la temperatura varíe de forma más acusada con la latitud así como con la hora del día. Las máximas diarias se dan un par de horas antes del atardecer mientras que el mínimo de temperatura se observa justo antes del amanecer (un fenómeno parecido ocurre en los desiertos de la Tierra). Por ejemplo, en la zona ecuatorial, la temperatura estival puede llegar a sobrepasar los 20°C durante el día, pero durante la noche puede desplomarse hasta los -80°C .

Como ocurre en la Tierra, la temperatura atmosférica disminuye con la altitud pero, en cambio, la escasez de oxígeno hace que en Marte no exista una capa de ozono que se encargue de absorber los rayos ultravioleta provenientes del Sol. Junto a la baja temperatura y la ausencia de oxígeno, este es un factor más con el que tendrían que enfrentarse los hipotéticos colonos de Marte.

El hecho de que la cantidad de gas en la atmósfera sea mucho menor que en la Tierra hace que la presión atmosférica de Marte sea también unas 100 veces menor que la terrestre. Un curioso fenómeno relacionado con la presión sobre la superficie de Marte y las alternancias de las estaciones fue inesperadamente descubierto por las sondas Viking en 1976. Después de varias semanas sobre la superficie marciana, los datos recogidos mostraron un continuado y drástico descenso de la presión atmosférica. No podía tratarse de un fallo de los sensores o de un fenómeno local porque ambas sondas registraron valores consistentes, a pesar de encontrarse en puntos muy distantes entre sí. ¡Parecía que parte de la atmósfera estaba desapareciendo! La explicación era que, debido a la cercanía del invierno en el hemisferio sur, la temperatura en el polo sur era tan baja que grandes cantidades

de dióxido de carbono de la atmósfera se estaban depositando en el casquete polar de dicho hemisferio en forma de hielo. El CO_2 se congela a una temperatura de -57°C , formando lo que se conoce como *hielo seco*. Con la llegada de la primavera a comienzos de 1977, el hielo seco se fue evaporando y la presión atmosférica volvió a subir. Al llegar el invierno al hemisferio norte, vuelve a darse el mismo fenómeno, acumulándose en este caso el hielo en el polo norte. Así, a lo largo del año, el CO_2 va pasando de un hemisferio a otro, formando depósitos de hielo seco en uno de los casquetes.

A pesar de su tenue atmósfera, no es extraña la presencia de nubes en el cielo de Marte. Posiblemente, las más llamativas sean las amarillentas, que están asociadas a las frecuentes e impetuosas tormentas de arena, que levantan grandes cantidades de polvo de la superficie, tintando de color anaranjado la atmósfera y las propias nubes. Estas nubes se conocían ya desde 1877, ya que pueden llegar a cubrir casi por completo el planeta, dándole una tonalidad anaranjada cuando se observan a través del telescopio. A pesar del bajo contenido de agua en la atmósfera, también se forman nubes de vapor de agua, de color blanquecino, y también visibles con telescopios terrestres. Muchas de ellas tienen un origen orográfico, formándose cuando las corrientes atmosféricas tienen que sortear los numerosos obstáculos elevados de la geografía marciana. Al ascender, el gas se enfría bruscamente, y el vapor de agua se condensa, formando nubes aisladas, delgadas y uniformes, similares a los estratos terrestres. También se dan las llamadas «nubes matinales» que en la práctica son más bien nieblas formadas durante el frío de la noche sobre una capa de escarcha. Durante el día, al subir la temperatura, la escarcha se sublima (se evapora) rápidamente. Las nubes más «exóticas», no tanto por su forma como por su composición, son las constituidas por dióxido de carbono. Estas se forman en las regiones polares, en otoño e invierno, donde la temperatura en superficie puede descender hasta los -150°C y a altitudes elevadas puede ser lo suficientemente baja como para que el CO_2 condense en forma de cristales de hielo, dando lugar a nubes blancas de aspecto similar al de los cirros terrestres.

¿DÓNDE ESTÁ EL AGUA DE MARTE?

El clima actual de Marte impide la presencia de agua líquida en su superficie. Sin embargo, al igual que en el caso de Venus, los científicos creen que en el pasado imperó un periodo mucho más benigno que el actual. También como en el caso de Venus, y de la propia Tierra, la atmósfera actual de Marte se formó a partir de la desgasificación de su interior, hace unos 4 000 millones de años. Los numerosos cráteres que cubren buena parte de la superficie del planeta son un reflejo de este agitado pasado. Esta atmósfera «secundaria» debió proporcionar el efecto invernadero necesario para que Marte tuviera una temperatura mucho más cálida, además de abundante agua, en forma de un sistema de ríos y lagos y, tal vez, un gran océano cubriendo buena parte del planeta. La superficie de Marte conserva numerosas señales de la presencia de agua en el pasado, tales como accidentes geográficos aparentemente producidos por erosión de agua o hielo (ver imagen inferior), minerales de origen sedimentario o arcilloso, redes y cauces fluviales, entre otros. Además, se cree que existía una verdadera red fluvial en el subsuelo, que conectaría unas regiones del planeta con otras. Incluso hay indicios de que el planeta experimentó grandes riadas de agua hace unos 3 500 millones de años.

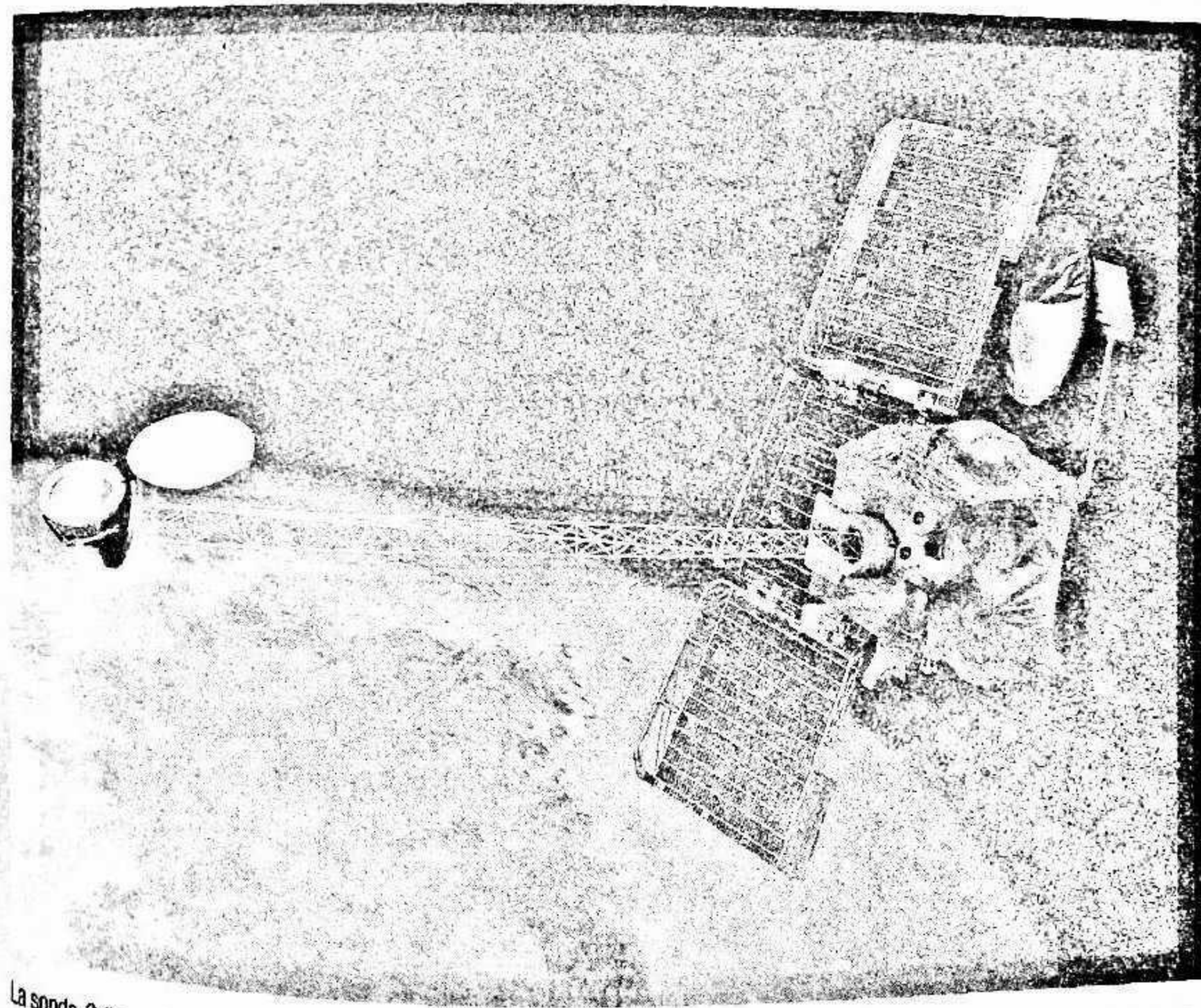
Agua líquida en las profundidades o helada bajo la superficie

¿Dónde ha ido a parar toda esta agua? Recordemos que, en el caso de Venus, donde también se cree que abundó el agua en su pasado remoto, la mayor parte se evaporó debido al efecto invernadero descontrolado y, posteriormente, las moléculas de agua se disociaron debido a la acción de los rayos ultravioleta. Este escenario es improbable en el caso de



La fotografía muestra el presumible rastro de antiguas corrientes de agua marcianas.

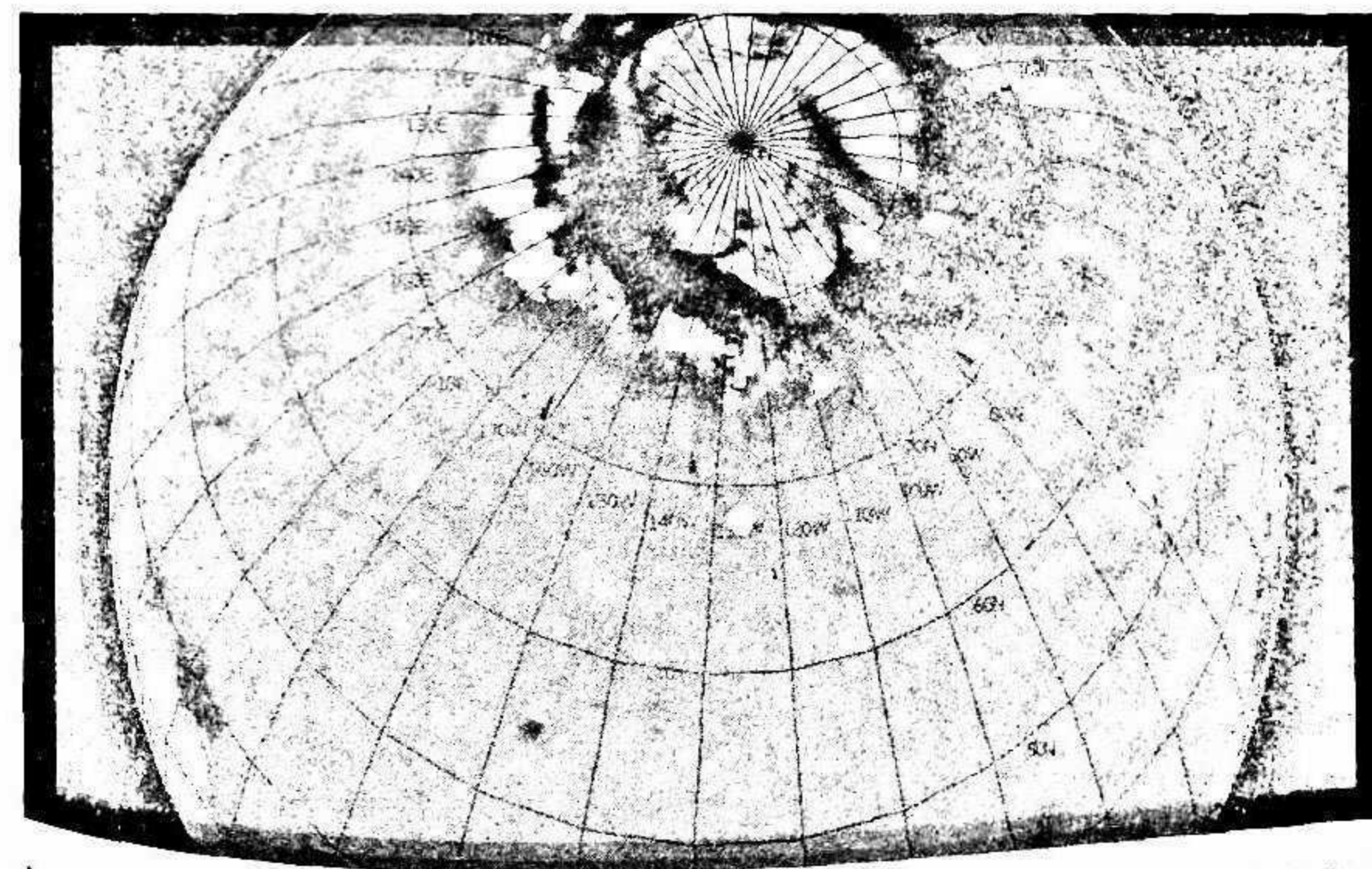
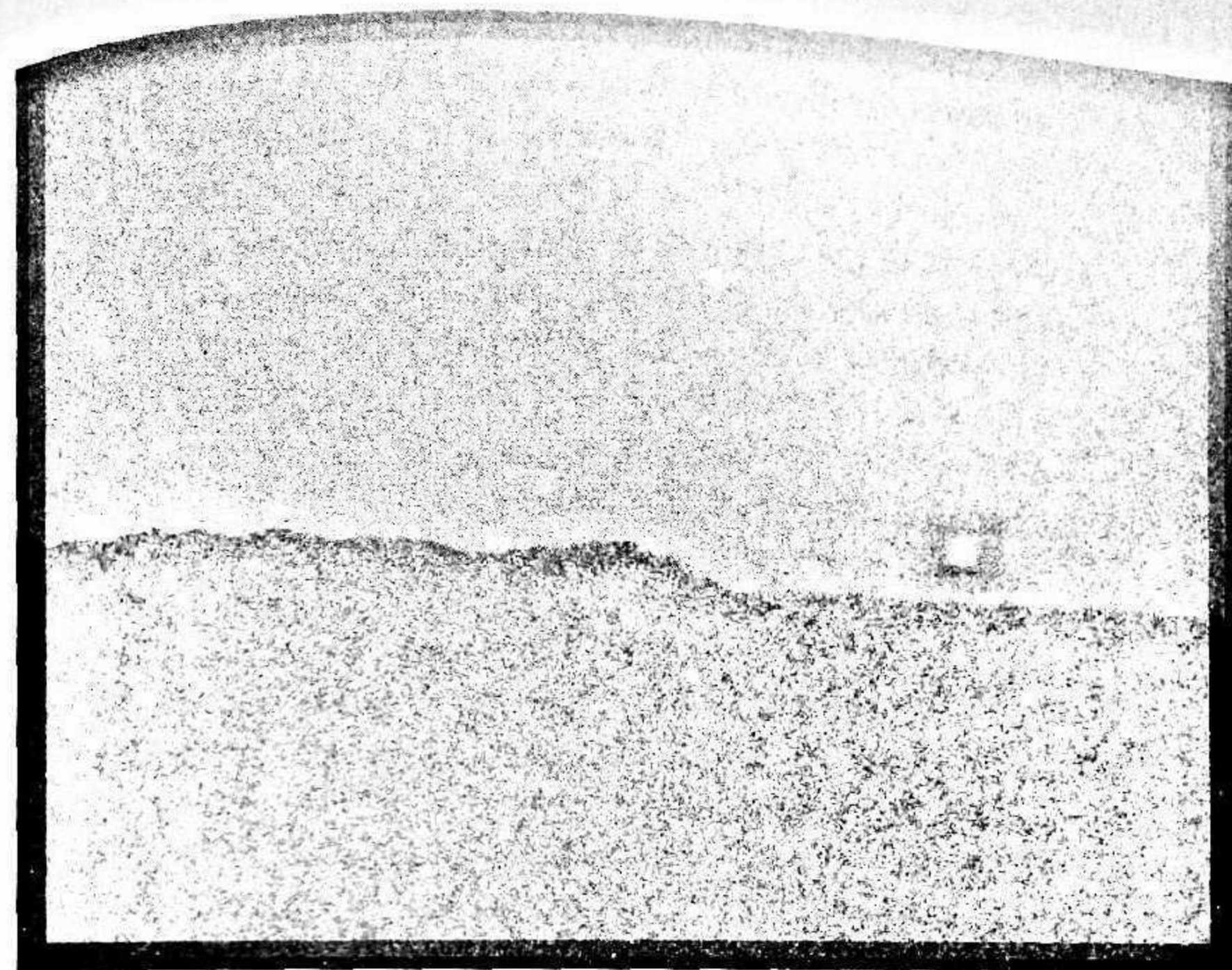
Marte ya que, debido a su mayor distancia al Sol, no experimentó este efecto invernadero extremo. Esto ha llevado a pensar a los científicos que Marte conserva buena parte de esta agua, bien en forma de hielo bajo su superficie, o incluso en forma líquida, a mayores profundidades. Esta conclusión ha hecho que uno de los principales objetivos de la exploración de Marte sea la búsqueda de agua. Se sabe que los casquetes polares almacenan grandes cantidades de agua, si bien la mayor parte del tiempo bajo una capa de hielo seco (CO_2). En 2002 la sonda Odyssey de la NASA (en la imagen inferior, recreación artística de la misma), en órbita en el planeta, detectó grandes cantidades de hidrógeno, indicativos de la presencia de agua, a latitudes más bajas (55°), justo bajo la superficie. En 2008, la también estadounidense sonda Phoenix llegó a tomar muestras por primera vez de agua en el ártico marciano, además de fotografiar una «nevada». En total, se han identificado más de cinco millones de metros cúbicos de hielo justo bajo la superficie, suficiente como para cubrir el planeta con un océano de 35 metros de profundidad. Se cree que, a profundidades mayores, podría haber todavía más agua acumulada.



La sonda Odyssey de la NASA se lanzó en 2001 con el objetivo de estudiar el clima de Marte y topografiar su superficie.

A pesar de la frecuente presencia de nubes, no llueve nunca. Al descender la temperatura, en lugar de precipitar en forma de agua, el vapor se condensa sobre la superficie en forma de escarcha o hielo. En septiembre de 2008 el vehículo de exploración Phoenix (en la imagen inferior de la página contigua, el lugar donde la sonda aterrizó) tomó fotografías de lo más parecido que podemos encontrar en Marte a una «nevada». Los copos de nieve se evaporaban ante de alcanzar la superficie, un fenómeno que bajo determinadas condiciones también se observa en la Tierra y se conoce como *virga*.

Terminaremos esta sección retomando la disputa entre Lowell y Wallace en relación a la temperatura de Marte. Aunque las numerosas sondas enviadas al planeta han demostrado que este último tenía razón en cuanto a que la temperatura marciana debería ser mucho menor que los 8°C sugeridos por Lowell, hay que tener en cuenta que una cosa es la temperatura que marca un termómetro y, otra, nuestra percepción térmica. Por ejemplo, al tocar un fragmento de metal y un trozo de madera en invierno, el primero nos parece más frío, cuando en realidad ambos se encuentran a la misma temperatura ambiente. La razón es que el metal es un buen conductor del calor y, por tanto, este fluye más fácilmente de nuestro cuerpo a dicho objeto. El viento tiene también un efecto sobre nuestra percepción térmica, ya que ayuda a evaporar la humedad de la piel y esto aumenta la sensación de frío. Los meteorólogos tienen en cuenta todos estos factores para dar la llamada «sensación térmica» en sus partes meteorológicas, junto a la temperatura del «termómetro». Ya que la atmósfera de Marte es mucho más tenue que la nuestra, el calor «escapará» con más dificultad de nuestro cuerpo y la sensación de frío será menor. Aplicando las mismas técnicas que se emplean en el clima terrestre, los meteorólogos pueden calcular cuál sería la temperatura equivalente para un habitante en la Tierra para una cierta temperatura de Marte. Los resultados son sorprendentes. Por ejemplo, en el punto de aterrizaje de la sonda Pathfinder de la agencia espacial estadounidense, la NASA, situado a una latitud de 48° sobre el ecuador, la temperatura media diurna fue de -14°C .



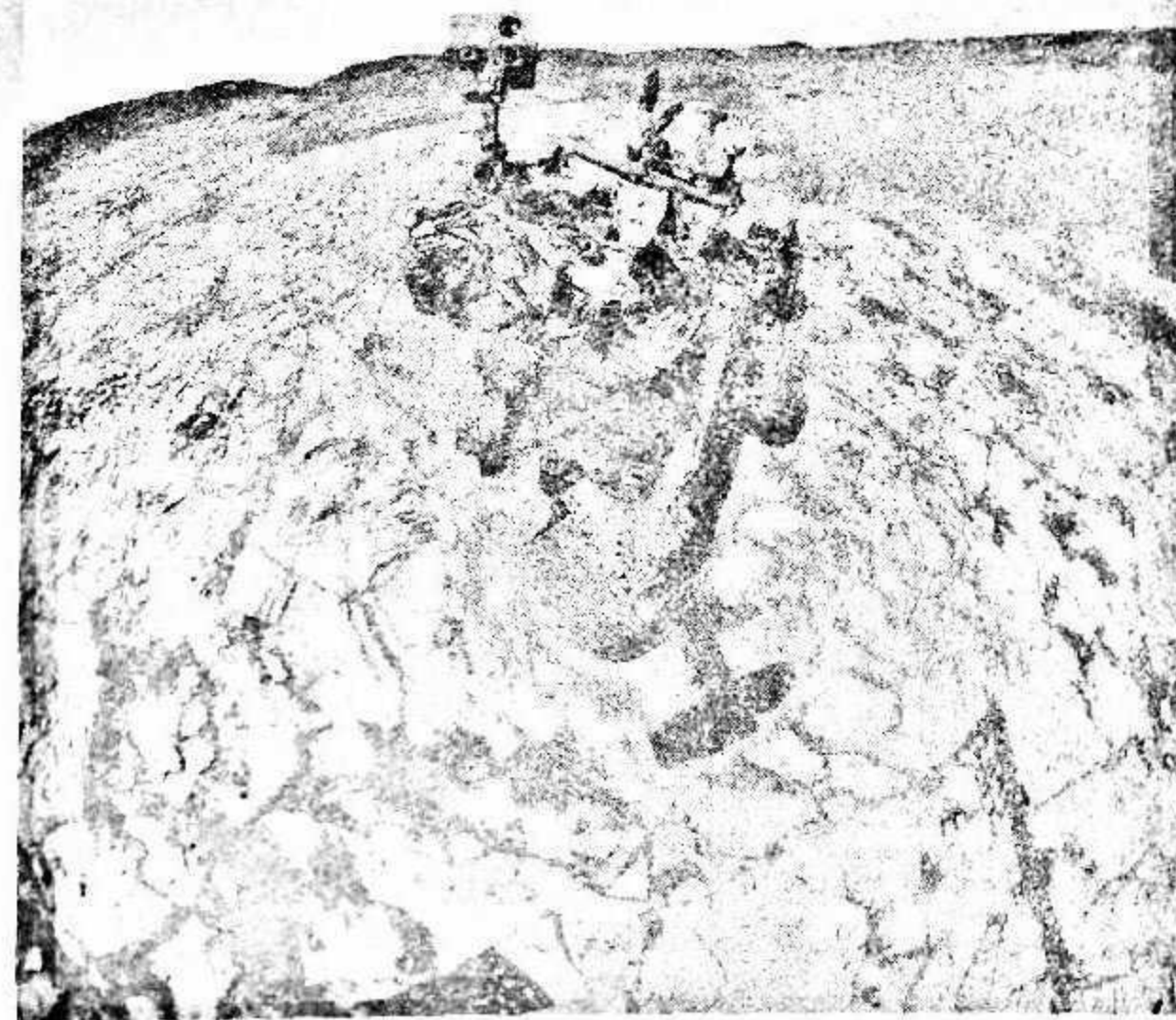
Arriba, atardecer sobre el cráter Gusev, fotografiado por el vehículo de exploración de la NASA Rover Spirit, el 19 de mayo de 2005. Sobre estas líneas, el lugar cercano al polo norte marciano donde aterrizó la sonda Phoenix en 2008.

EXPLORACIÓN DE MARTE

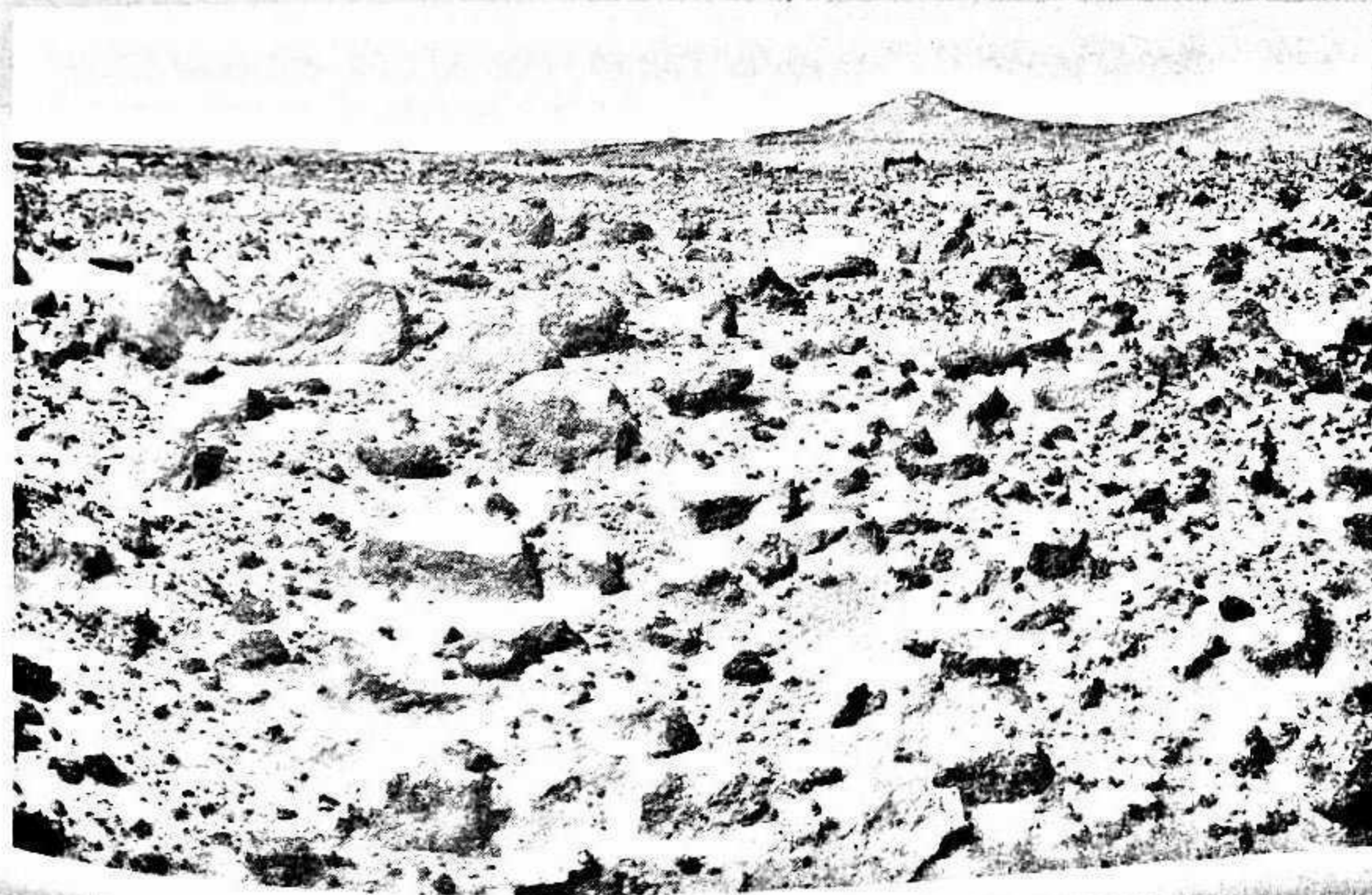
Los inicios de la exploración de Marte fueron un episodio más en la carrera especial que Estados Unidos y la Unión Soviética protagonizaron tras la Guerra Fría. Se trataba de un formidable desafío tecnológico para la época, como quedó patente tras los primeros intentos fallidos. Entre 1960 y 1969 la agencia espacial rusa lanzó nueve sondas con destino a Marte bajo el programa Mars. Todas ellas fracasaron. Por su parte, en 1965 la NASA iniciaba el programa Mariner, consistente en pequeñas sondas no tripuladas, enviadas en parejas, cuya misión era realizar medidas del planeta mientras pasaban por su proximidad. Algunas, como Mariner 3 o Mariner 8, no alcanzaron su objetivo, pero otras culminaron con éxito sus misiones. Así, las fotografías enviadas por Mariner 6 y 7 sirvieron para desmentir la existencia de canales en Marte. Mariner 9 fue la primera que consiguió orbitar en torno al planeta, fotografiando el 100 % de la superficie e identificando cañones, volcanes y cauces fluviales. Tras el éxito estadounidense, los soviéticos se propusieron ser los primeros en mandar una sonda a la superficie marciana, lo que consiguieron en 1971 con la sonda Mars 3. Eso sí, fue una breve incursión en terreno marciano porque, tras 20 segundos de retransmisión de imagen de TV, la sonda dejó de emitir. En 1976, la NASA se propuso también enviar dispositivos que pudieran aterrizar sobre la superficie marciana. El primero fue el proyecto Viking, consistente en dos vehículos espaciales, cada uno de los cuales constaba de una nave que orbitaría en torno a Marte, albergando un módulo de descenso que se desacoplaría de la primera para caer y posarse sobre la superficie. Los dos vehículos Viking fueron lanzados en 1976, entrando ambos en órbita de Marte, y dejando caer con éxito sus módulos de descenso. Ambos permanecieron durante años sobre la superficie del planeta, haciendo valiosas medidas meteorológicas y tomando las primeras fotos a color del planeta. Viking 1 y 2 enviaron datos hasta 1982 y 1980, respectivamente. Los siguientes intentos de ambos bandos terminaron en fracaso: los soviéticos, perdieron las sondas Phobos 1 y 2 que pretendían estudiar tanto el planeta Marte como sus lunas Fobos y Deimos. La NASA sufrió un fracaso similar en 1992 con la sonda Mars Observer, que perdió también contacto antes de alcanzar la órbita de Marte.

Tras los descalabros, grandes éxitos

El siguiente hito en la exploración marciana llegó en 1997, con la misión estadounidense Mars Pathfinder, que consiguió poner sobre la superficie de Marte el primer vehículo móvil, el *Sojourner*. A este le sucedieron en 2004 los vehículos gemelos Spirit y Opportunity que en sus paseos por la superficie de Marte encontraron numerosas evidencias de la existencia de agua en el pasado del planeta. La misión superó con creces sus expectativas pues, después de 13 años, esta última aún sigue operativa, enviando datos a la Tierra. En 2012, aterrizaba en Marte el astromóvil Curiosity (en la fotografía), también operativo a día de hoy. Curiosity, el vehículo espacial de la misión Mars Science Laboratory (MSL), va equipado con los instrumentos científicos más avanzados del momento y también ha superado las expectativas de vida que la NASA tenía para él: dos años. Todo apunta que aún tiene cuerda para rato.



A la izquierda, una imagen *selfie* realizada por el vehículo robótico Curiosity de la NASA, en Marte desde 2012. Abajo, imagen de la superficie marciana tomada por el vehículo Viking 1.



Teniendo en cuenta las condiciones del viento en este punto, produciría una sensación térmica equivalente a la que tendríamos en la Tierra a una temperatura ambiente de $+1^{\circ}\text{C}$. En el sur de Inglaterra, durante los meses de invierno, la temperatura media es de $+4,4^{\circ}\text{C}$ que, teniendo en cuenta el viento promedio, produce una sensación térmica de 0°C , un grado por debajo de la sensación térmica que tendríamos a latitudes tropicales en Marte. Aunque los futuros colonos de Marte deberán enfrentarse a numerosas adversidades, quizá, después de todo, la temperatura no sea la mayor de ellas.

Un planeta rojo... de atardeceres azules

Como ya vimos cuando nos referimos al cielo terrestre, el característico color azul de nuestro cielo es una consecuencia de los continuos rebotes (*dispersión*, en el argot científico) de los rayos de luz con las moléculas del aire. Estos rebotes son más eficientes para las longitudes de onda más cortas (azul), de ahí que sea ese el color dominante de nuestro cielo. Para una atmósfera delgada como la de Marte, estos rebotes deberían ser menos probables que en la Tierra, por lo que esperaríamos un cielo más oscuro que el nuestro, tal vez en un tono azul oscuro o púrpura. Sin embargo, cuando se difundieron las primeras fotografías obtenidas por las sondas Viking, estas mostraron un sorprendente y familiar color azul, ¡como si se hubiera tomado en un desierto cualquiera de la Tierra! Pero había sido un error. Las fotografías en color resultan de la mezcla de tres imágenes monocromas, cada una de un tono distinto: rojo, verde y azul. Los técnicos encargados de esta mezcla usaron su experiencia en fotografía terrestre para mezclar las tres imágenes hasta obtener el resultado que les pareció «correcto» que, naturalmente, correspondía al cielo azul. El error fue inmediatamente corregido y, al recalibrar las fotos, la composición evidenció un tono entre ocre y rosa, que tampoco se correspondía con el color azul oscuro o púrpura que adelantamos arriba. Esta tonalidad se debe a la presencia de partículas de polvo y are-

na en suspensión, debidas a las continuas tormentas de arena. Más sorprendentes, por inesperadas, fueron las imágenes del atardecer de Marte enviadas en 2005 por el vehículo terrestre Rover Spirit de la NASA (ver imagen superior de la página 67). Estas nos muestran un disco solar de color azulado, sobre un fondo o halo también de color azul. La explicación es un poco más compleja que en el caso del crepúsculo terrestre ya que, junto a las propias partículas del aire, entran también en juego las partículas de polvo que, además de dispersar la luz, como ocurre con las moléculas del aire, tienen la propiedad de absorber parte de la radiación. Estas partículas de polvo están compuestas fundamentalmente de óxidos de hierro, que absorben en todas las longitudes de onda excepto las correspondientes al color rojo, que son reflejadas, de ahí su color rojo. Al estar suspendidas en la atmósfera, juegan un doble papel: por un lado, dispersan (desvían) parte de la radiación azul (como hacen las partículas de aire) pero, por otro lado, absorben parte de esta radiación azul. El color resultante depende de la competencia entre ambos efectos, y es necesario recurrir a modelos matemáticos para discernir cuál de ellos será el dominante. Por ejemplo, un estudio reciente realizado por el matemático estadounidense Kurt Ehlers y colaboradores concluye que el efecto dominante depende del ángulo de observación con respecto a la dirección del Sol y de la cantidad de atmósfera que debe atravesar la luz. Durante el atardecer (o amanecer), al mirar en dirección al Sol, el ángulo de observación es pequeño y el recorrido de la luz por la atmósfera es máximo. En este caso, termina dominando el color azul. La explicación matemática es compleja, pero el lector puede quedarse con el sugestivo contraste entre la Tierra, planeta azul con crepúsculos rojos, y Marte, el planeta rojo con crepúsculos azules.

Los planetas gigantes

Más allá de la región del cinturón de asteroides se hallan los cuatro grandes colosos de gas y hielo: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Estos planetas exteriores, de vistosos colores y envueltos en mantos de nubes aparentemente apacibles, albergan los fenómenos meteorológicos más violentos y extremos de todo el sistema solar.

A pesar de que los cuatro planetas exteriores se formaron a partir de la misma nebulosa primigenia que dio lugar a los planetas interiores, las condiciones en que lo hicieron fueron muy diferentes. Los planetas interiores se formaron en la proximidad del Sol, sometidos a su calor y al chorro de partículas emitidas. Unas condiciones que hicieron imposible la retención de elementos ligeros como el hidrógeno y el helio, gracias a los cuales tuvo lugar el engrosamiento de los planetas gigantes, formados en un área más alejada y, por tanto, más fría del disco de la nebulosa solar. En esta zona también se formaron protoplanetas que, además de material rocoso, contenían hielos de varios tipos. Estos, al alcanzar un tamaño varias veces superior al de la Tierra, comenzaron a atrapar gravitatoriamente los gases de hidrógeno y helio que se habían podido mantener en esta región más alejada, a salvo del calor y del viento solar. A medida que su tamaño iba aumentando, también lo hacía su gravedad, atrapando más y más gas. El resultado fueron cuatro enormes bolas de gas, el cuarteto de planetas exteriores, conformados por unos núcleos de hielo y roca. Su composición es muy parecida a la de la nebulosa primigenia y, por tanto, también a la del propio Sol. Mientras que en los

planetas interiores el oxígeno es el elemento más abundante, en los planetas exteriores (figura 1) domina el hidrógeno, bien en forma molecular (H_2), bien en forma de otros compuestos como amoníaco (NH_3), metano (CH_4) o agua (H_2O).

Según hemos visto, el clima de un planeta viene determinado en gran medida por la cantidad de luz que recibe del Sol. La radiación solar es la responsable, por ejemplo, de las abrasadoras temperaturas diurnas de Mercurio, del efecto invernadero descontrolado de Venus, o de la circulación atmosférica terrestre. En el caso de los planetas exteriores, debido a la enorme distancia que los separa del Sol, la cantidad de luz que reciben es muchísimo menor y, por tanto, es de esperar que se trate de mundos mucho más fríos que los terrestres. Como ya sabemos, es posible determinar la temperatura de un objeto distante, como un planeta o estrella, a partir de la radiación que emite. En el caso de un planeta, la mayor parte de esta radiación corresponde a la zona del infrarrojo, con lo que es necesario recurrir a instrumentos

que capten la luz que proviene de esta parte del espectro electromagnético. Los cuatro planetas gigantes están envueltos por una gruesa atmósfera, con lo que estas medidas proporcionan información de la temperatura del manto nuboso. Las temperaturas que se obtienen con esta técnica son $-150^\circ C$ para Júpiter, $-178^\circ C$ para Saturno y $-214^\circ C$ para Urano y Neptuno. Excepto en el caso de Urano, y aun tratándose de temperaturas bajísimas, estos valores son mayores que los que cabría esperar a partir de la energía que reciben y reflejan del Sol. Este curioso fenómeno sugiere que Júpiter, Saturno y Neptuno poseen una fuente de calor interna suficientemente intensa como para modificar la temperatura de su atmósfera y, por tanto, influir en su climatología. Los científicos creen que este calor interno se originó durante la formación del planeta, cuando la energía gravitatoria se transformó en energía térmica, la cual se ha ido liberando poco a poco, en un lento proceso de enfriamiento. La Tierra tiene también una fuente de calor interna, originada por la desintegración de sustancias radiactivas en su interior, aunque apenas tiene influencia en la temperatura global del planeta.

Otra característica llamativa de la meteorología de los planetas gigantes es su sistema de vientos (figura 2). Si el conocimiento de los vientos terrestres fue posible gracias a las expediciones de los navegantes que surcaron mares y océanos a partir del siglo xv, el de los vientos de los planetas exteriores se debe en gran medida a las expediciones de los vehículos espaciales no tripulados Pioneer y Voyager realizadas en la décadas de 1970 y 1980. Gracias a estos ingenios, sabemos que Urano y Neptuno poseen un sistema de vientos sorprendentemente parecido al de la Tierra, con una corriente en dirección este-oeste sobre la zona ecuatorial y tropical (similar a nuestros vientos alisios), y una corriente hacia el este a latitudes mayores en cada hemisferio (análogas a las corrientes de chorro). En Júpiter y Saturno los vientos también se disponen en bandas paralelas al ecuador, pero hay al menos 10 o 12, alternándose el sentido de la corriente, dando lugar a un intrincado sistema de bandas zonales. Dado que el motor de la circulación atmosférica terrestre es la radiación solar, cabría esperar que los vientos de los planetas exteriores fueran más débiles, dis-

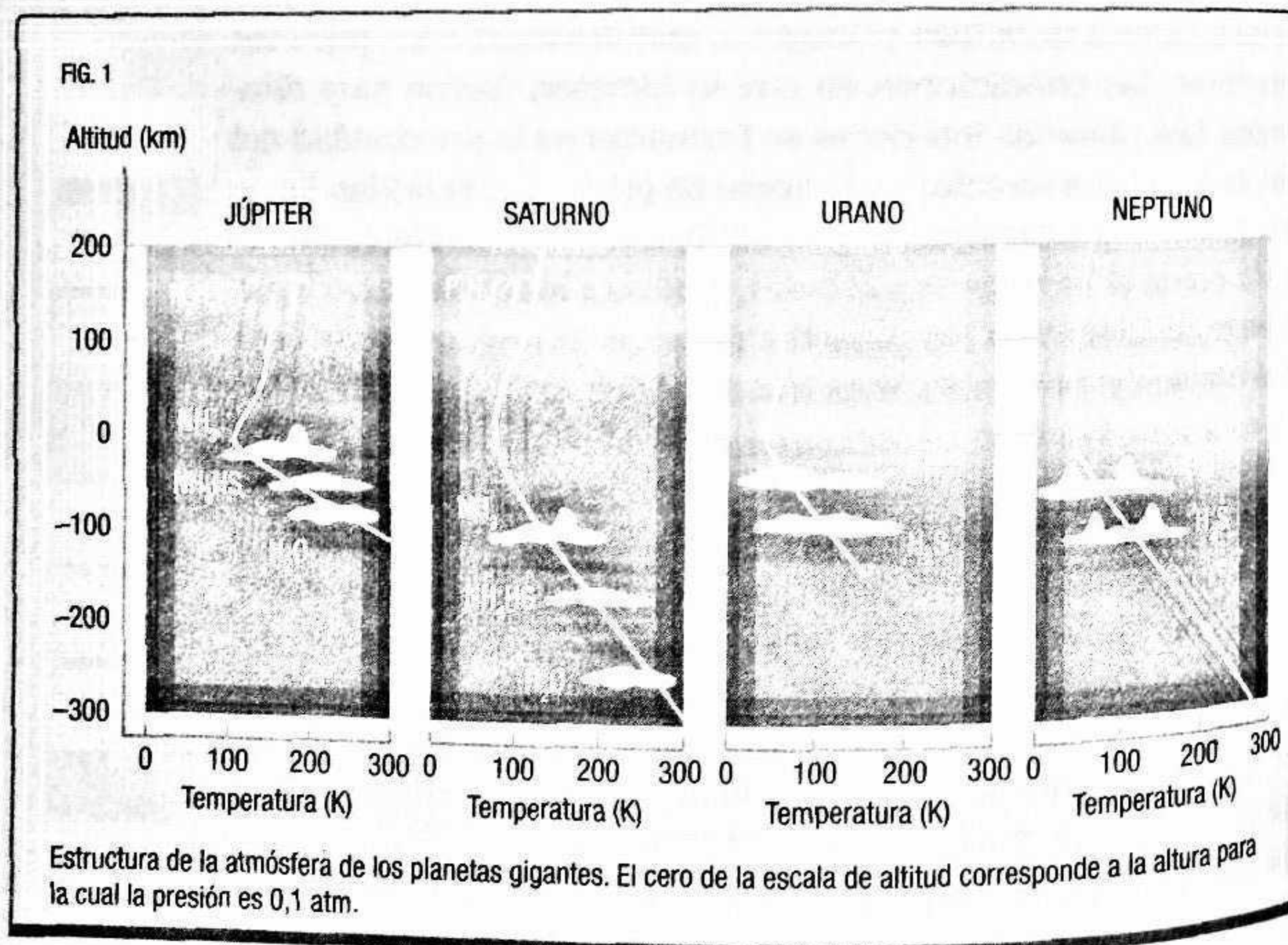
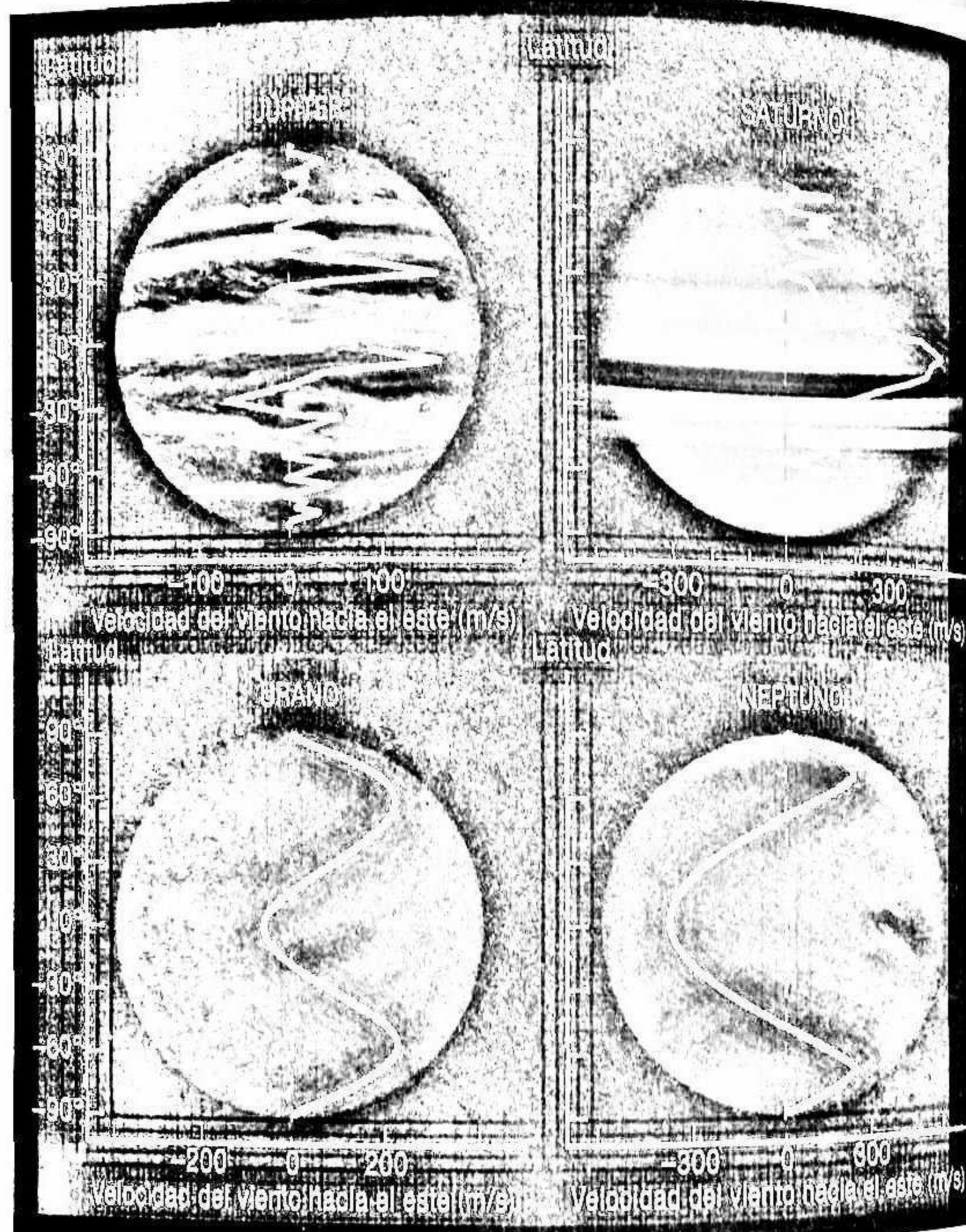


FIG. 2



Distribución de vientos zonales en las atmósferas de los planetas gigantes.

minuyendo además con la distancia al Sol. Las medidas muestran que es justo al revés. En Júpiter, los vientos alcanzan velocidades tres veces mayores que en la Tierra, mientras que en Neptuno pueden ser hasta diez veces mayores. De hecho, en este planeta se observan los vientos más fuertes de todo el sistema solar. Como en el caso de sus temperaturas atmosféricas, se cree que se debe al calor interno que desprende el planeta.

Los planetas gigantes también albergan las mayores tormentas. Algunas son visibles desde la Tierra, como la Gran Mancha Roja de Júpiter, un enorme anticiclón de un diámetro superior al de la Tierra que ha permanecido en su atmósfera al menos durante los últimos 300 años. Otras han sido observadas gracias a las sondas espaciales enviadas desde los años setenta del siglo pasado. Su longevidad y virulencia es otra de las muchas cuestiones que los científicos planetarios intentan comprender.

JÚPITER, GIGANTE ENTRE GIGANTES

Es el planeta exterior más grande y más próximo al Sol. Su diámetro es unas once veces el de la Tierra y su masa unas 300 veces mayor, equivalente a dos veces y media la del resto de planetas y objetos menores, como lunas o asteroides, juntos. Su densidad promedio es de $1,33 \text{ g/cm}^3$ (es decir 1,33 veces mayor que la del agua), lo que supone menos de una cuarta parte de la de la Tierra. Esto significa que debe estar compuesto fundamentalmente por elementos ligeros. Las medidas realizadas confirman que su composición es muy parecida a la del Sol, con un 99% de hidrógeno y helio. A pesar de disponer del «combustible» adecuado, hubiera necesitado una masa unas 80 veces mayor para que se iniciasen en su interior las reacciones termonucleares que lo hubieran convertido en la segunda estrella de nuestro sistema solar. Su composición gaseosa y su rápida rotación (da un giro completo en menos de 10 horas) producen un cierto achatamiento de su zona polar.

A pesar de estar cinco veces más lejos del Sol que la Tierra, su colosal tamaño hace que sea fácilmente visible a simple vista, superando incluso en magnitud a Sirius, la estrella más brillante de la bóveda celeste. Su intenso brillo y su cadencioso movimiento en el firmamento (invierte casi doce años en completar cada giro en torno al Sol), fueron tal vez las razones por las que los antiguos romanos le dieron el nombre del principal dios de su mitología. Además de realizar las primeras observaciones con telescopio del planeta, Galileo descubrió sus cuatro lunas mayores, las

denominadas lunas galileanas. A través del telescopio, el disco de Júpiter muestra un conjunto de vistosas franjas claras y oscuras alternantes, todas ellas orientadas en paralelo al ecuador. Las franjas más oscuras, de color rojizo, reciben el nombre de *bandas o cinturones*, mientras que las de color claro se denominan *zonas*. Aunque se trata de estructuras permanentes, varían lentamente de anchura, color e intensidad. Lejos de ser homóneas, ambas están marcadas por una serie de perturbaciones en forma de plumas, remolinos, lazos y óvalos de diferentes tonalidades, desde el blanco hasta el rojo. Algunas de estas formaciones surgen y desaparecen en cuestión de días o semanas mientras que otras muestran una sorprendente longevidad. Entre estas últimas, la más llamativa y célebre es sin duda la llamada Gran Mancha Roja (GMR) (figura 3), una gigantesca tormenta en forma de óvalo, situada en el hemisferio sur del planeta, que ha permanecido en su superficie al menos desde mediados del siglo XVII, donde fue claramente descrita por Giovanni Cassini. Parece ser que el astrónomo usó la GMR como referencia para determinar el periodo de rotación del planeta. Actualmente es lo bastante grande como para abarcar una vez y media el diámetro de la Tierra, aunque se han registrado periodos con mayor tamaño. Comparada con las tormentas terrestres, que se extinguen en días o semanas a lo sumo, la persistencia de la GMR es excepcionalmente desmesurada.

La predicción meteorológica para la Gran Mancha Roja y otras tormentas es que permanecerán indefinidamente, a pesar de los intensos vientos en su periferia. De hecho, esta persistencia es uno de los misterios acerca de los planetas gigantes.

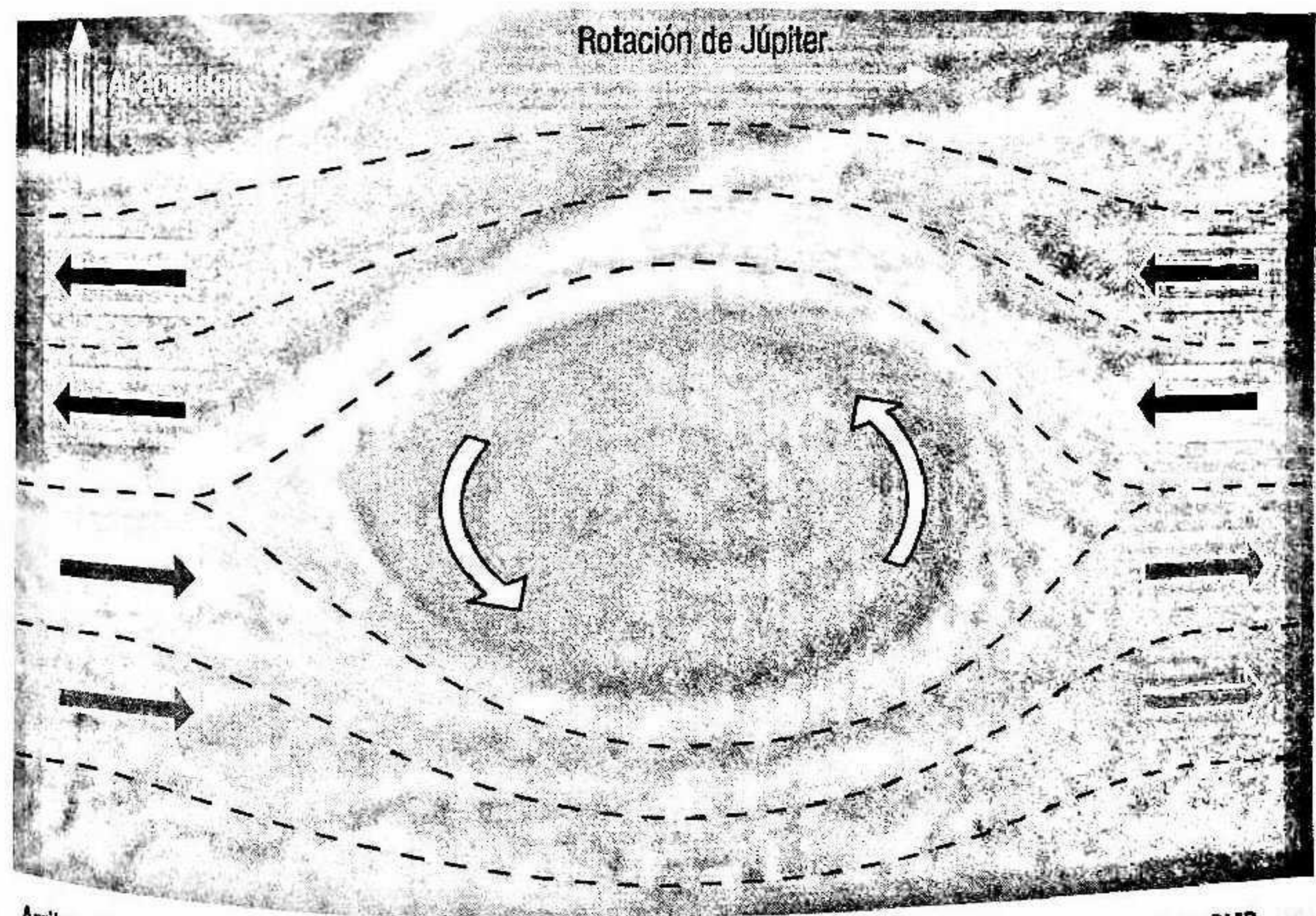
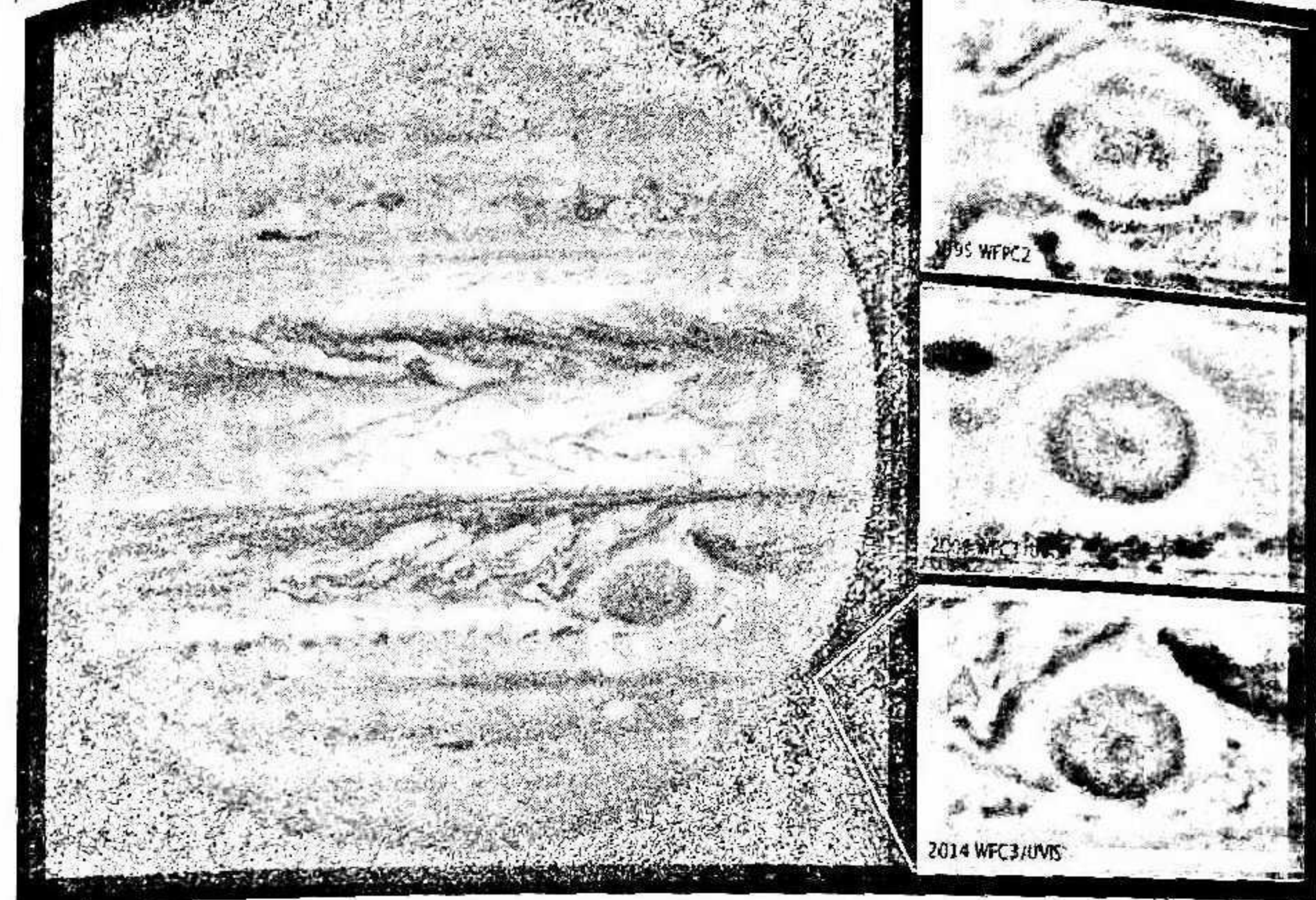
ANDREW INGERSOLL

El origen y la naturaleza de esas formaciones no se comenzó a entender hasta bien entrado el siglo XX, en gran medida gracias a la *espectroscopía*. Esta técnica consiste en descomponer y analizar la radiación electromagnética que llega del planeta en sus diferentes longitudes de onda y permite estimar la temperatura de la atmósfera del planeta e incluso identificar los elementos que la componen. Ya vimos que un objeto a una determinada temperatura emite radiación electromagnética. Para el rango

géneas, ambas están marcadas por una serie de perturbaciones en forma de plumas, remolinos, lazos y óvalos de diferentes tonalidades, desde el blanco hasta el rojo. Algunas de estas formaciones surgen y desaparecen en cuestión de días o semanas mientras que otras muestran una sorprendente longevidad. Entre estas últimas, la más llamativa y célebre es sin duda la llamada Gran Mancha Roja (GMR) (figura 3), una gigantesca tormenta en forma de óvalo, situada en el hemisferio sur del planeta, que ha permanecido en su superficie al menos desde mediados del siglo XVII, donde fue claramente descrita por Giovanni Cassini. Parece ser que el astrónomo usó la GMR como referencia para determinar el periodo de rotación del planeta. Actualmente es lo bastante grande como para abarcar una vez y media el diámetro de la Tierra, aunque se han registrado periodos con mayor tamaño. Comparada con las tormentas terrestres, que se extinguen en días o semanas a lo sumo, la persistencia de la GMR es excepcionalmente desmesurada.

El origen y la naturaleza de esas formaciones no se comenzó a entender hasta bien entrado el siglo XX, en gran medida gracias a la *espectroscopía*. Esta técnica consiste en descomponer y analizar la radiación electromagnética que llega del planeta en sus diferentes longitudes de onda y permite estimar la temperatura de la atmósfera del planeta e incluso identificar los elementos que la componen. Ya vimos que un objeto a una determinada temperatura emite radiación electromagnética. Para el rango

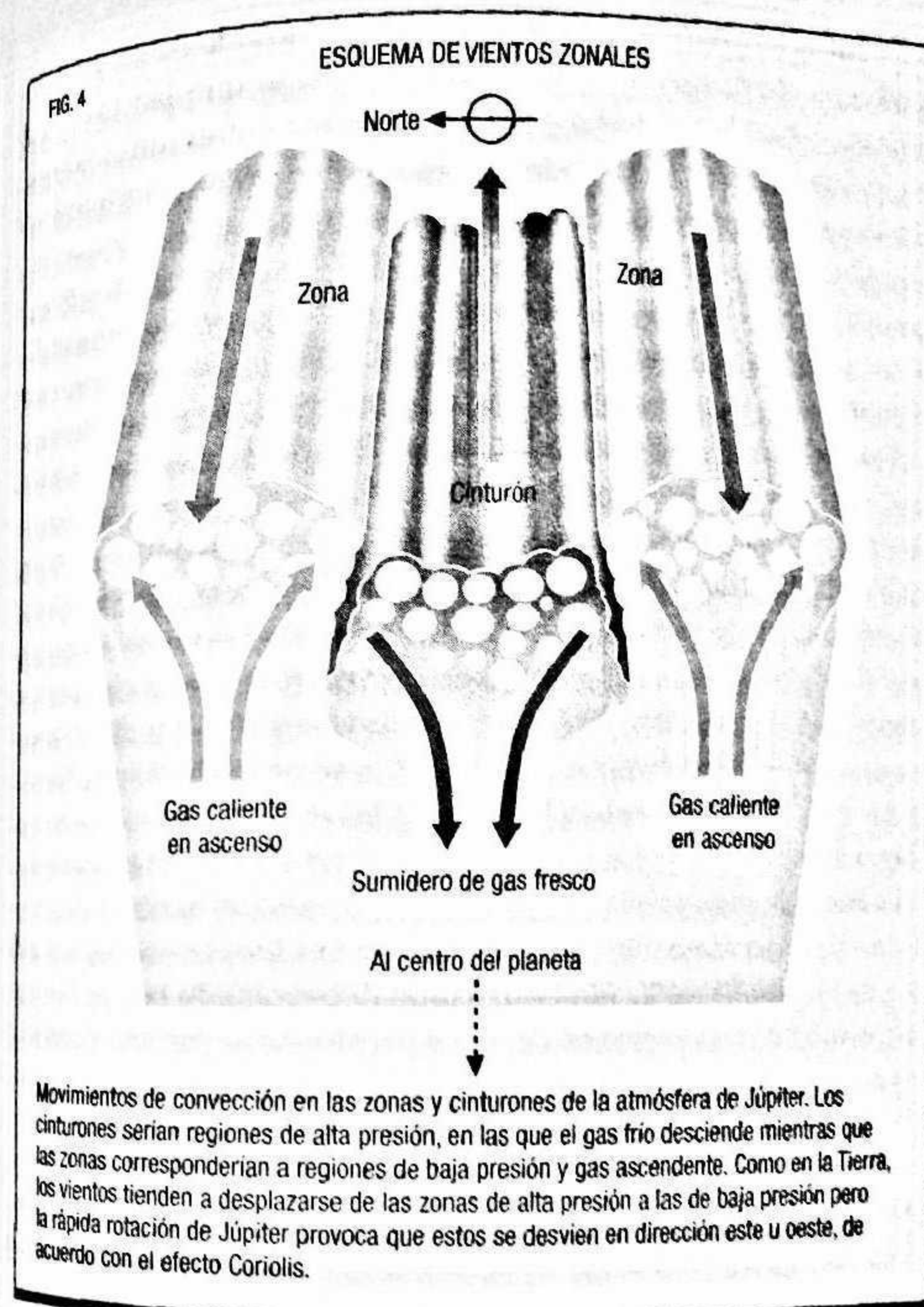
FIG. 3



Arriba, Júpiter, con la Gran Mancha Roja (GMR) en la mitad inferior. A su derecha, imágenes de la GMR tomadas por el telescopio espacial Hubble a lo largo de un periodo de 20 años. Sobre estas líneas, esquema de la GMR y las corrientes que la rodean.

de temperaturas de un planeta, la mayor parte de esta radiación corresponde a la zona del infrarrojo, con lo que las imágenes infrarrojas de la superficie del planeta son de gran utilidad para determinar la temperatura de las diferentes regiones. Dos datos fueron revelados: por un lado, se encontró que Júpiter emite casi el doble de energía de la que recibe del Sol. Esto indica que el planeta posee una potente fuente interna de un calor que fue acumulado por el planeta en la etapa de su formación y que ha venido liberando a lo largo de los últimos cientos de millones de años. La temperatura deducida en la parte alta de su atmósfera fue de -150°C , pero la existencia de la fuente interna de calor indicó que esta temperatura iría aumentando gradualmente a medida que nos adentráramos en el planeta. Por otro, se observó que la intensidad de radiación infrarroja emitida en las zonas era mucho menor que en los cinturones y, por tanto, la temperatura también. Dado que esta aumenta con la profundidad y que la radiación que nos llega proviene del manto nuboso del planeta, esto significa que las nubes de color oscuro que observamos en los cinturones se encuentran a altitudes más bajas que las nubes claras que se observan en las zonas.

A partir de estas observaciones, y del conocimiento de la circulación atmosférica terrestre, los científicos planetarios han llegado a la conclusión de que las zonas y cinturones se corresponden con regiones de gas ascendente y descendente, respectivamente (figura 4). Según este modelo, las zonas corresponderían a regiones de bajas presiones, donde el gas cálido asciende, enfriándose, formando nubes altas y, por tanto, frías. Serían análogas a las regiones ecuatoriales terrestres, donde el aire tiende a ascender debido al mayor calentamiento solar. Los cinturones, por el contrario, se corresponderían con regiones de altas presiones y gas descendente, dando lugar a nubes a menor altitud. En definitiva, estos movimientos convectivos serían análogos a las células de Hadley de la Tierra. Por otro lado, el gas tiende a desplazarse de las regiones de mayor presión a las de menor presión. Esto hace que, al llegar al techo de la troposfera, el gas en ascenso en las zonas se desplace horizontalmente en dirección a los cinturones adyacentes, de menor presión. De no ser por el movimiento de



rotación, se originarían corrientes de sur a norte o de norte a sur. Sin embargo, dicha rotación da lugar a la fuerza de Coriolis, que, como sabemos, tiende a desviar la corriente en dirección este u oeste. Esto convierte las corrientes de convección en bandas horizontales que rodean el planeta. En la Tierra, el resultado son los vientos alisios, que ocurren a nivel del mar en zonas tropicales, y las corrientes de chorro, que se dan a latitudes mayores en la par-

te alta de la troposfera, en la frontera entre las diferentes células de Hadley. Estas corrientes de chorro se observan también en la atmósfera de Júpiter, justo en la frontera entre las zonas y bandas. Como la velocidad de rotación es mucho mayor en Júpiter, el efecto de la fuerza de Coriolis también aumenta.

A finales de la década de 1970, las sondas Voyager 1 y 2 pasaron a unos miles de kilómetros del planeta, proporcionando imágenes sin precedentes del mismo. La Voyager 1 obtuvo una «película» de la evolución del manto nuboso que puso de manifiesto la frenética actividad y variabilidad de las nubes jovianas. Por todas partes surgían nuevas formaciones que desaparecían en cuestión de días. Se observó con gran nitidez cómo eran arrastradas por los vientos zonales. También revelaron que las corrientes de chorro entre zonas y bandas eran en realidad dos corrientes viajando en sentidos opuestos que dan lugar a torbellinos. La propia GMR está confinada entre dos de dichas corrientes enfrentadas que, al encontrarse este obstáculo, lo rodean en sentido contrario a las agujas del reloj mientras la propia mancha permanece casi inmóvil, desafiando los fuertes vientos.

Como sabemos por la experiencia terrestre, el sentido de giro de las grandes masas de aire que conforman los ciclones y anticiclones no es aleatorio, sino que viene determinado por la fuerza de Coriolis. En las regiones de bajas presiones se forman corrientes de aire ascendente. El aire circundante se mueve en dirección a la zona de baja presión para ocupar el vacío creado pero, al mismo tiempo, es desviado por la fuerza de Coriolis, dando como resultado una corriente que gira en sentido antihorario, en el hemisferio norte, y horario, en el hemisferio sur. En las zonas de altas presiones el efecto es el contrario. El aire desciende y desplaza radialmente al aire circundante, el cual a su vez se desvía dando lugar en este caso a un movimiento de rotación en sentido horario en el hemisferio norte y antihorario en el sur.

En Júpiter se observa este mismo fenómeno. En las zonas, al tratarse de regiones de bajas presiones, los torbellinos giran en sentido antihorario en el hemisferio norte y horario en el hemisferio sur. Se trata, por tanto, de tormentas anticiclónicas. En los cinturones, el efecto es el contrario, dando lugar a tormentas

ciclónicas. La GMR que, como mencionamos, se encuentra en el hemisferio sur y gira en sentido antihorario, sería por tanto una enorme tormenta anticiclónica conformada por nubes altas.

Un hecho que dejó desconcertados a los científicos fue que, en el intervalo de los cuatro meses transcurridos entre la llegada de las dos sondas Voyager a Júpiter, los vientos zonales mantuvieron exactamente la misma velocidad para cada latitud. Este hecho es aún más sorprendente si tenemos en cuenta que los cinturones experimentan fuertes cambios en su coloración a lo largo de los meses o años y, además, van acompañados de remolinos y otras formaciones que aparecen y desaparecen en cuestión de días. Como lo definió Andrew Ingersoll, el contraste entre la regularidad de los vientos zonales y los agitados torbellinos que aparecen y desaparecen son una muestra de cómo el orden puede surgir del caos. Todavía no se dispone de una única teoría para explicar el origen de esta compleja actividad atmosférica.

Algunos especialistas sostienen que, como en la Tierra, el motor se encuentra en la energía que el planeta recibe del Sol. Otros opinan que, dada la lejanía del planeta, el origen debe hallarse en el calor interno del mismo. Se estima que el núcleo de Júpiter se encuentra a una temperatura de unos 30 000 °C.

El manto nuboso de Júpiter

Ya vimos que en la Tierra los fenómenos meteorológicos tienen lugar en la troposfera, la capa más baja de la atmósfera, que se extiende desde la superficie terrestre hasta una altitud de unos 10 km, por encima de la cual comienza la estratosfera. La temperatura de la troposfera decrece con la altura, estabilizándose en su parte más alta. Por analogía, en el caso de los planetas gigantes se toma por convenio el límite superior de la troposfera como la altitud para la cual la temperatura se hace mínima. En Júpiter, esto ocurre a una altitud de unos 30 km por encima de las nubes más altas, donde la temperatura alcanza un valor de -160 °C y la presión es aproximadamente una décima parte de la terrestre a nivel del mar (es decir, 0,1 atmósferas). Al no tener una super-

ficie sólida, su troposfera no tiene un límite inferior definido. A medida que descendemos, tanto la presión como la temperatura se van incrementando. Por ejemplo, a una profundidad de unos 100 km la temperatura ha ascendido a unos 20 grados bajo cero y la presión es de unas cinco atmósferas.

La radiación electromagnética que emite un planeta o estrella nos permite determinar, además de su temperatura, su composición. Cada sustancia absorbe radiación en ciertas longitudes de onda, reflejando el resto. Mediante el espectrómetro es posible identificar estas longitudes de onda absorbidas conocidas como *líneas de absorción*. Como estas son únicas para cada elemento, constituyen una especie de código de barras unívoco. Gracias a ello, en la década de 1930 se descubrió la presencia de metano (CH_4) y amoníaco (NH_3) en la luz reflejada por las nubes de Júpiter. El hidrógeno molecular (H_2), más abundante pero también más difícil de detectar, se descubrió en 1960. El caso del helio es aún más complejo, ya que absorbe radiación en la región del ultravioleta, en longitudes de onda que no consiguen atravesar la atmósfera terrestre. En este caso, su detección fue posible gracias al espectrómetro ultravioleta instalado en la sonda Pioneer 10, que pasó junto al planeta en 1973.

Conociendo a qué temperatura y presión se condensa cada una de estas sustancias, los científicos han especulado que deben existir en Júpiter tres capas de nubes (ver figura 1). La capa superior, situada a unos 30 km bajo la tropopausa, consistiría en pequeños cristales de amoníaco (NH_3). Estos serían los principales constituyentes de las zonas, dándole su tonalidad más clara. La segunda capa se sitúa a unos 55 km de profundidad y está formada por hidrosulfuro de amonio (NH_4HS), una combinación del amoníaco y del sulfuro de hidrógeno (H_2S). La tercera capa, a unos 100 km por debajo de la tropopausa, estaría formada por gotas y cristales de hielo de agua, que se correspondería con las nubes azuladas. Estas dos capas nubosas más bajas, más cálidas, son las nubes que vemos en los cinturones.

Curiosamente, los compuestos que forman las tres capas de nubes son esencialmente incoloros, con lo que sigue sin entenderse bien el origen de las variadas tonalidades que nos ofrece

la atmósfera joviana. Se cree que estos se deben a trazas de otros compuestos o elementos, como azufre, fósforo o incluso algunos compuestos orgánicos.

Un paseo por las nubes de Júpiter

El planetólogo Andrew Ingersoll ha imaginado cómo sería un hipotético (e improbable) paseo por las nubes de Júpiter a bordo de un globo o dirigible.

El paseo comenzaría en la parte alta de la atmósfera, por encima del techo de nubes, donde la presión es de 0,1 atm, es decir, una décima parte de la presión media terrestre a nivel del mar. Allí, la luz del Sol nos llegaría en toda su plenitud, aunque sería escasa pues, por su posición, Júpiter recibe 27 veces menos luz que la Tierra. Tan poca, que la temperatura no superaría los 150 °C bajo cero. Durante el día, que dura algo menos de cinco horas, el disco solar destacaría en el cielo, pero se vería seis veces más pequeño que desde la Tierra. En compensación, gozaríamos del espectáculo de sus cuatro lunas mayores: Ío, Europa, Ganimedes y Calisto, que frecuentemente producirían eclipses de Sol. A simple vista, el único planeta apreciable sería Saturno, mostrando un brillo modesto.

Para desplazarnos en longitud podríamos aprovechar las rápidas corrientes de chorro, que pueden alcanzar los 600 km/h. Esto nos permitiría trasladarnos desde una punta a otra del planeta en unas cuantas semanas. Para cambiar de sentido, solo tendríamos que modificar nuestra latitud para coger la corriente de chorro opuesta. Esta maniobra sería delicada porque en la frontera entre cinturones y zonas tendríamos que atravesar remolinos u otras turbulencias. Si nos desplazáramos desde las latitudes ecuatoriales a los polos, encontraríamos que la temperatura apenas cambia, señal inequívoca de que existe algún mecanismo que reparte el calor por todo el planeta. Con un poco de suerte, podríamos deleitarnos con alguna aurora polar.

Una vez explorada la parte alta de la atmósfera, descenderíamos unos 30 km cruzando el primer manto de nubes, unos cirros

compuestos por cristales de amoníaco. La temperatura aquí es de unos 120 °C bajo cero, pero la presión sería comparable a la terrestre. El cielo es de color negro azulado, surcado por hermosas nubes multicolores. Más abajo, las altitudes son más cálidas y el cielo se irá tornando de una tonalidad entre roja y marrón. A una profundidad de unos 125 km, en la base de las nubes de vapor de agua, la temperatura puede ser de unos agradables 20 °C-30 °C, si bien la presión comienza a ser un problema (5-10 atmósferas). Mirando hacia arriba ya apenas veremos la luz del Sol, bloqueada por una gruesa capa de nubes. Es probable que llueva, aunque esta lluvia no mojará ninguna superficie, porque no hay ningún terreno sólido sobre el que caer y, en cualquier caso, al descender a zonas más cálidas, terminará evaporándose y volviendo al manto de nubes. La oscuridad es total, apenas interrumpida por los relámpagos producidos en el seno de las enormes tormentas.

Si descendemos 100 km más las condiciones se vuelven mucho más hostiles. La temperatura habrá ascendido hasta unos 150 °C y la presión hasta unas 20 atmósferas. En esta región fue donde perdió el contacto la sonda Galileo, que se sumergió en la atmósfera del planeta en 1995. Justo aquí terminará también nuestro viaje. No es posible llegar hasta el centro del planeta en ningún ingenio imaginable. Mucho antes, nuestra nave se fundiría y vaporizaría, y sus átomos se disolverían como minúsculas gotas de agua en un gran océano.

Descendiendo a las calderas del coloso

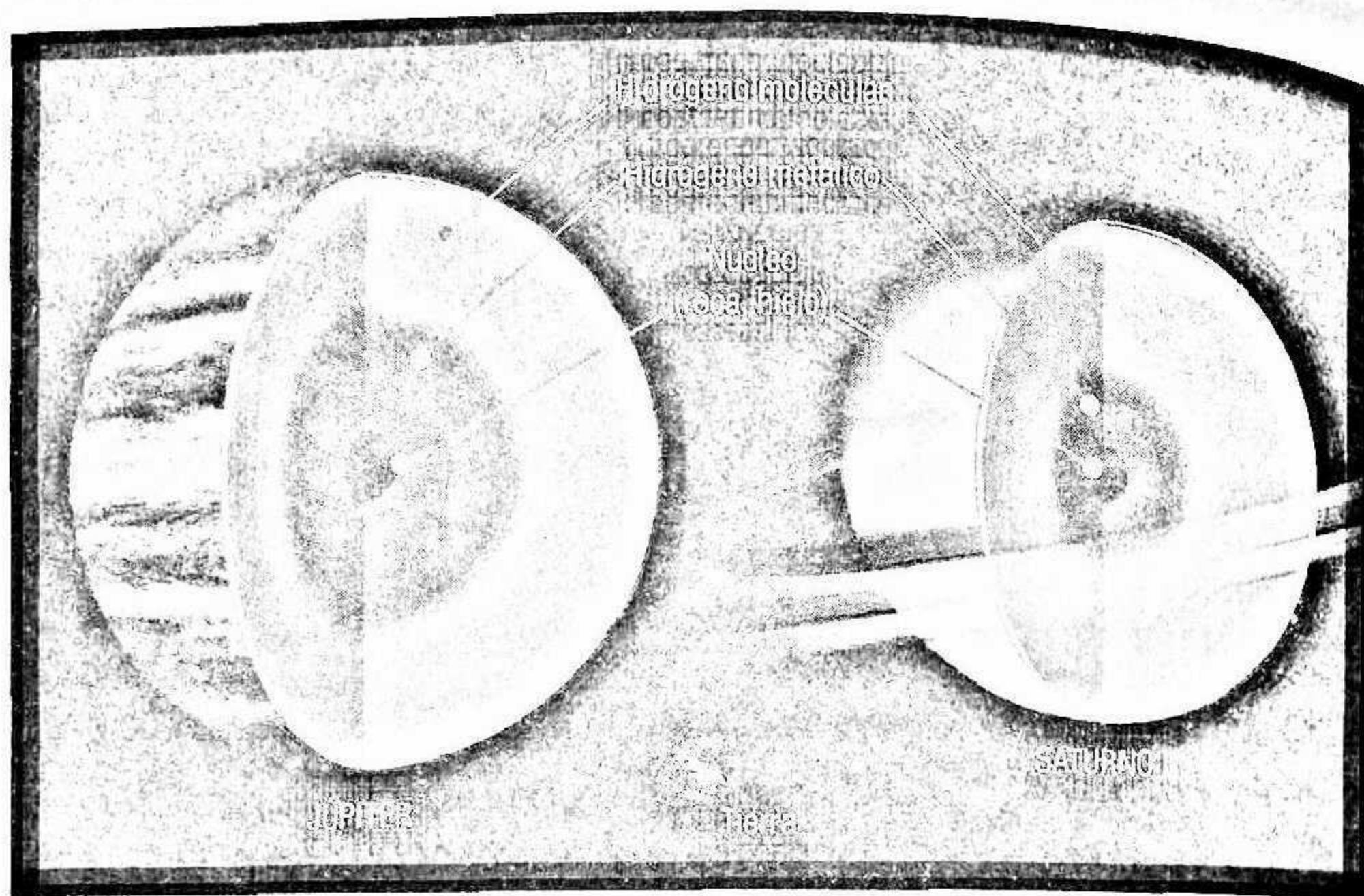
Aunque se perdió para siempre, las únicas medidas directas que disponemos del interior de Júpiter se deben a esa sonda que, tras llegar a Júpiter con su nave nodriza, se desacopló y descendió a través de su manto nuboso. Antes de enmudecer logró enviar datos durante 58 minutos, durante los cuales recorrió 160 km de atmósfera. Cuando dejó de transmitir, la temperatura era de 153 °C y la presión de 23 atmósferas.

Aunque no hay medidas directas de la atmósfera a profundidades mayores, los científicos planetarios han elaborado mo-

delos matemáticos para describir sus propiedades, tales como la presión, la temperatura o la composición, a partir de valores que sí conocemos, como el tamaño, su densidad o la energía que desprende su atmósfera. Según estos modelos, el interior del planeta consistiría en tres grandes capas. La más externa, que se extiende desde el manto de nubes hasta una profundidad de unos 20 000 km, está compuesta fundamentalmente por hidrógeno molecular. A partir de unos 1 000 km, la presión supera las 100 000 atm y el hidrógeno comienza a comportarse como un líquido, haciéndose paulativamente más denso y caliente. A una profundidad de unos 20 000 km comenzaría la segunda capa, de unos 40 000 km de espesor. En esta región, la presión supera los millones de atmósferas. En estas condiciones, los electrones se desligan de los protones, moviéndose libremente, lo que permite la conducción de electricidad, como ocurre en los metales, de ahí que el hidrógeno en este estado sea conocido como *hidrógeno metálico*. Una evidencia indirecta de estas corrientes internas podría ser el gigantesco campo magnético del planeta. Por último, estaría el núcleo del mismo, compuesto por roca y hielo, es decir, por elementos más pesados. La temperatura aquí podría ser de 30 000 °C y la presión de 80 millones de atmósferas. Muchísima, pero no suficiente como para iniciar la fusión del hidrógeno, que habría convertido a Júpiter en una estrella.

SATURNO, EL SEÑOR DE LOS ANILLOS

Así como Venus y la Tierra son, en muchos aspectos, planetas gemelos, también lo serían Júpiter y Saturno. Este es el segundo gran gigante de nuestro sistema solar, con un diámetro equivalente a unos 9,5 diámetros terrestres, un poco menor que el de Júpiter. Sus componentes principales son también el hidrógeno y el helio, y se cree que posee una estructura de capas cualitativamente similar a la de Júpiter: un núcleo rocoso, rodeado de un manto de hidrógeno líquido que, a su vez, estaría rodeado de una gruesa capa de hidrógeno molecular (figura 5). Desde la



Modelo del interior de Júpiter y Saturno, mostrando su núcleo rocoso, y las capas de hidrógeno metálico, hidrógeno líquido y finalmente su atmósfera gaseosa.

Tierra, observamos apenas su manto nuboso, de un color amarillento-anaranjado. Las fotos de las sondas Voyager también revelaron la existencia de franjas, pero estas son mucho menos marcadas que en Júpiter, dándole un aspecto más uniforme y menos colorido.

Saturno se encuentra al doble de distancia del Sol que Júpiter. En un sistema solar a escala, con la Tierra orbitando a un metro del Sol, Júpiter lo haría a unos cinco metros, y Saturno a 9,5 m. A simple vista, no pasa de ser un puntito brillante en el firmamento. Galileo, al observarlo con su telescopio, anotó dos «ex-traños lóbulos», uno a cada lado, que no supo interpretar. Medio siglo después, en 1655, Christiaan Huygens, equipado con un telescopio más potente, acertó a identificar las protuberancias como un anillo plano que rodeaba el planeta. Las observaciones posteriores revelaron que lo que parecía ser un solo anillo era

en realidad una sucesión de miles de anillos que a día de hoy fascinan tanto a los astrónomos profesionales como también a los aficionados.

Como en Júpiter, la rápida rotación del planeta produce un cierto achatamiento de los polos, más acusado en el caso de Saturno, a pesar de que su tiempo de rotación —la duración de un día saturniano— es similar al de Júpiter (unas 10 horas). Esto sugiere que el interior de Saturno es menos rígido que el de Júpiter, lo cual apunta a que su capa de hidrógeno molecular (dihidrógeno, H_2) es mucho más gruesa, haciendo además que la densidad de Saturno sea menor que la de su hermano mayor.

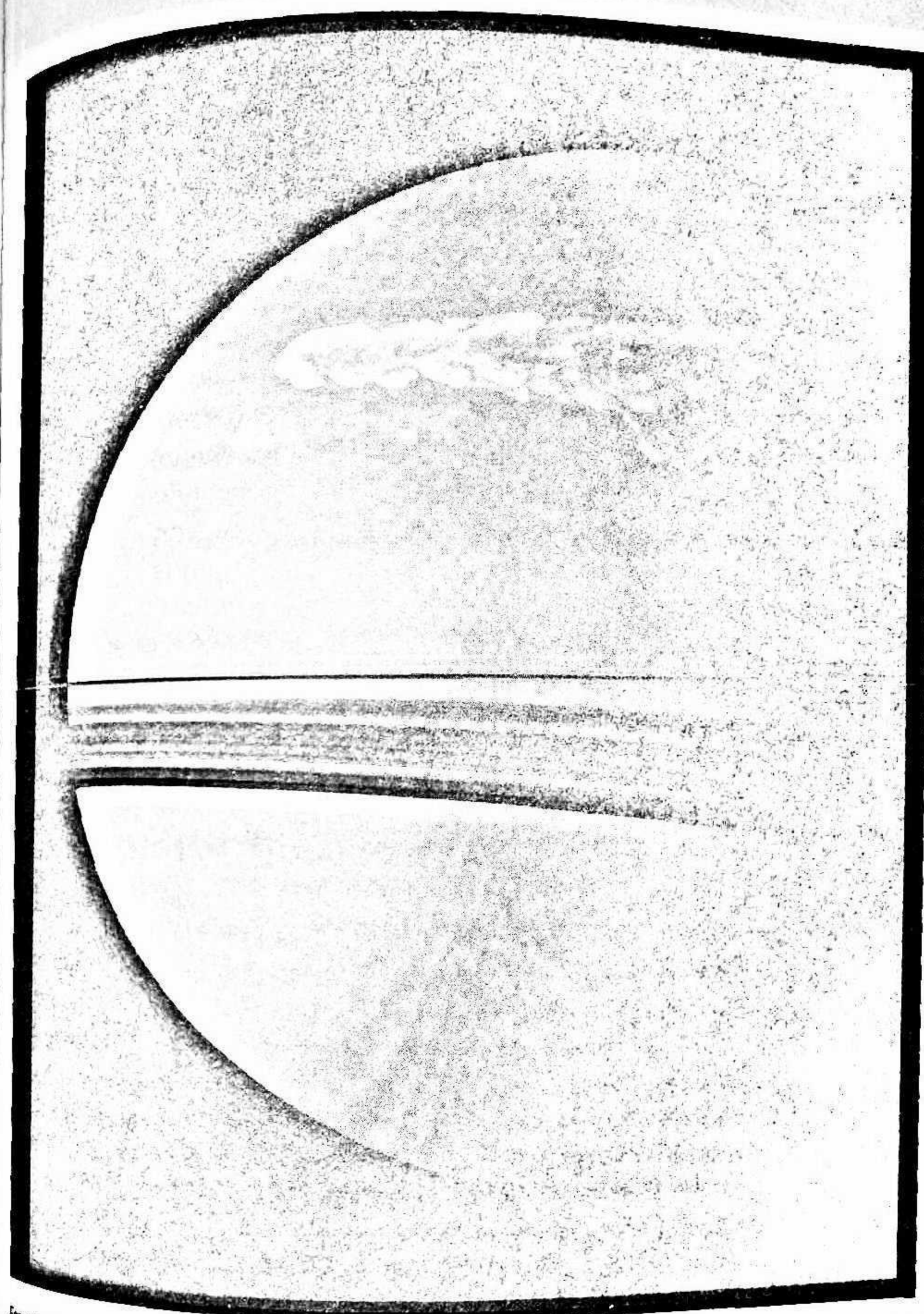
Saturno, como Júpiter, emite más radiación de la que recibe del Sol, concretamente, dos veces y media más. Esto significa que también posee una fuente de energía interna, pero, según los cálculos, esta no procede solo del calor acumulado durante su formación. ¿De dónde procede el calor adicional que desprende su interior? La explicación más aceptada fue la ofrecida por dos astrofísicos, Edwin Salpeter (1924-2008), de origen austríaco, y el neozelandés David Stevenson (n. 1948), a mediados de la década de 1970. Ambos relacionaron esta cuestión con otra para la que no se tenía explicación, que era la menor cantidad de helio en la atmósfera de Saturno, en comparación con la de Júpiter y con la del propio Sol. ¿Cómo podía ser si todos procedían de la misma nebulosa primigenia? Salpeter y Stevenson hicieron una propuesta ingeniosa para explicar y vincular ambos fenómenos. Imaginaron que Saturno, al ser algo más pequeño que Júpiter, se habría enfriado más rápidamente, desencadenando la condensación del helio gaseoso en gotas de helio líquido que precipitarían al interior del planeta como si de lluvia se tratase. Esto explicaría la menor cantidad de este gas en la atmósfera de Saturno. Por otro lado, la fricción de ingentes cantidades de gotas de helio con el hidrógeno circundante produciría el calor adicional que aparentemente alimenta la «caldera» de Saturno. Se cree que este proceso comenzó hace unos 2000 millones de años y que Júpiter se encuentra próximo a experimentar este mismo fenómeno.

La atmósfera de Saturno

La atmósfera de Saturno está formada, como la de Júpiter, por los compuestos más simples derivados del carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno: metano (CH_4), amoníaco (NH_3) y vapor de agua (H_2O). También, como en Júpiter, las nubes de Saturno se distribuyen en capas: la más alta, de cristales de amoníaco, una intermedia de hidrosulfuro de amonio (NH_4HS), y una capa inferior de cristales de hielo de agua.

Teniendo en cuenta la similitud entre sus atmósferas, parece extraño que estos planetas sean tan diferentes en apariencia. La explicación parece encontrarse en la diferencia de masa entre ambos colosos. Al ser Júpiter tres veces más masivo, la fuerza gravitatoria sobre su atmósfera es mucho mayor, comprimiendo sus tres capas de nubes en una rango de unos 75 km, mientras que en Saturno esas mismas capas ocupan unos 300 km. Esto hace que las más profundas, responsables de los colores más oscuros e intensos, estén parcialmente oscurecidas por la gruesa atmósfera que yace sobre ella. Aunque esto explicaría el color más homogéneo y apagado de Saturno, el origen de los diferentes colores es, como en el caso de Júpiter, incierto.

A pesar de su aspecto apacible, la atmósfera de Saturno se ve surcada por fuertes vientos en dirección este-oeste, similares a los de Júpiter, pero de mayor intensidad, pudiendo alcanzar velocidades de hasta 1800 km/h en la zona ecuatorial (figura 2). Estas corrientes dan lugar también a remolinos en forma de óvalo, menos marcados que los jovianos. Sin embargo, de vez en cuando gigantescas tormentas irrumpen en su atmósfera. En 2010, la sonda Cassini (ver imagen en página contigua), en la órbita de Saturno desde 2004, fue testigo de una de estas tormentas que, avanzando a gran velocidad, llegó a rodear al planeta por completo. Según los registros previos, estas tormentas «envolventes» parecen ocurrir cada 30 años lo que, curiosamente, coincide con el periodo orbital del planeta. En los últimos 140 años se han registrado apenas media docena de ellas pero, cuando ocurren, se trata de fenómenos espectaculares. Vienen además acompañadas de fuertes descargas eléctricas, responsables de



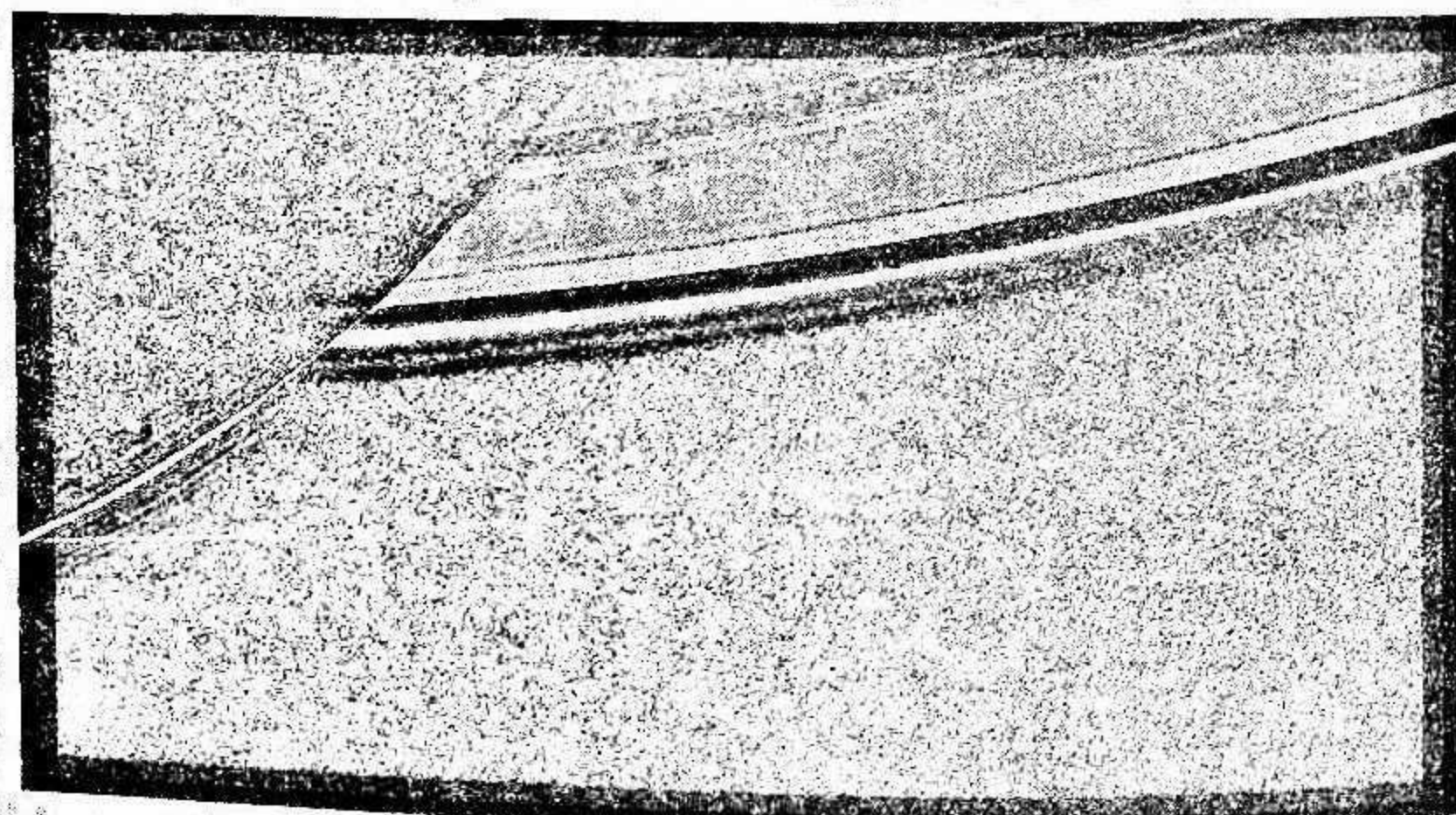
Espectacular tormenta en el hemisferio norte de Saturno, formada en diciembre de 2010 y fotografiada por la sonda Cassini en febrero de 2011. Para entonces, la cola de la tormenta rodeaba ya completamente el planeta.

EL CIELO DE SATURNO

En septiembre de 2017, y tras 20 años en el espacio, la sonda Cassini sobrevolará por última vez el planeta Saturno, esta vez para adentrarse en su atmósfera, emulando a lo que hizo la sonda Galileo en Júpiter. Aunque el objetivo de esta última maniobra, bautizada como el *Grand Finale*, es evitar una colisión fortuita de la sonda con alguna de las lunas de Saturno, los científicos ven en ella una oportunidad única para recoger valiosísimos datos acerca de la atmósfera del planeta y observar más de cerca que nunca sus anillos. Los últimos minutos de la sonda, antes de perder contacto con la Tierra, serán frenéticos, con todos sus sensores recogiendo datos de todo tipo, de su campo magnético, de la composición de la atmósfera, de los vientos... pero tendrá tiempo también para captar imágenes sin precedentes de sus anillos y nubes.

Lo que, posiblemente, Cassini nos mostrará

Adelantándonos a estas imágenes históricas, podemos imaginar cómo será el cielo de Saturno observado desde su manto nuboso. Aun brillando 100 veces menos que en la Tierra, el astro rey dominará el cielo diurno. Seguramente, cuando sus rayos atraviesen los cristales de hielo de las nubes de amoníaco, producirán bellos efectos ópticos, similares a nuestros halos y parhelios (un fenómeno producido por la reflexión de la luz solar en las nubes que da lugar a varias imágenes del Sol dispuestas simétricamente). El cielo se verá de un color azul oscuro, que se irá volviendo más amarillento a medida que nos sumerjamos en las nubes. Salvo que nos encontremos justamente en el ecuador, podremos disfrutar del espectáculo producido por sus anillos (ver imagen inferior), dispuestos en forma de arco y surcando toda la bóveda del cielo. De noche, sobre el firmamento estrellado, quizá podremos deleitarnos con el panorama de sus lunas, si bien, aunque se han identificado ya más de medio centenar, la mayoría son pequeñas y las mayores están muy alejadas del planeta. Titán, por ejemplo, la mayor de todas, se vería como la mitad de nuestra Luna y mucho menos brillante, ya que refleja una porción pequeña de la luz que recibe del Sol.



Fotografía tomada en 2013 por la sonda Cassini, en órbita alrededor de Saturno, donde se aprecia el complejo sistema de anillos. Más abajo, señalizada con una flecha, se aprecia la Tierra, visible como un pequeño punto azul.

impactantes relámpagos que han sido fotografiados también por la sonda Cassini.

URANO, EL GIGANTE DE HIELO

Urano no pasa de ser un débil puntito de luz en el firmamento que, posiblemente, fue confundido con una estrella en el mundo antiguo. Su descubrimiento se atribuye al astrónomo William Herschel quien, en 1781, se percató del movimiento del objeto sobre el fondo estrellado y, aunque originalmente lo confundió con un cometa, otros astrónomos más experimentados le hicieron ver que lo que había descubierto era... ¡un nuevo planeta!

Urano está 20 veces más alejado del Sol que la Tierra, lo que supone casi 3 000 millones de kilómetros. Esto hace que, aunque su diámetro sea cuatro veces superior al terrestre, el planeta se muestra como un pequeño y difuso disco de un tono verde-azulado, incluso a través de un potente telescopio. La situación cambió drásticamente con el paso de la sonda Voyager 2, que sobrevoló el planeta en 1986, y que a día de hoy es la única sonda que ha visitado el planeta.

Una peculiaridad de Urano respecto al resto de planetas del sistema solar es que su eje de rotación está inclinado completamente sobre el ecuador, concretamente 98°. Esto le da el curioso aspecto de una peonza rodando sobre su órbita. Una de las hipótesis más aceptadas de este hecho es que en el pasado debió colisionar con un planeta errante de un tamaño comparable al de la Tierra. En el momento del paso de la Voyager 2, en 1986, el polo sur del planeta apuntaba al Sol, siendo por tanto verano en el hemisferio sur. Cada una de las cuatro estaciones dura unos 21 años terrestres, con lo que habrá que esperar hasta la década de 2030 para que llegue el verano al hemisferio norte, momento en el que el polo norte apuntará al Sol. Otra consecuencia de su anómala oblicuidad es que, en los polos, el día (y la noche) dura 42 años terrestres.

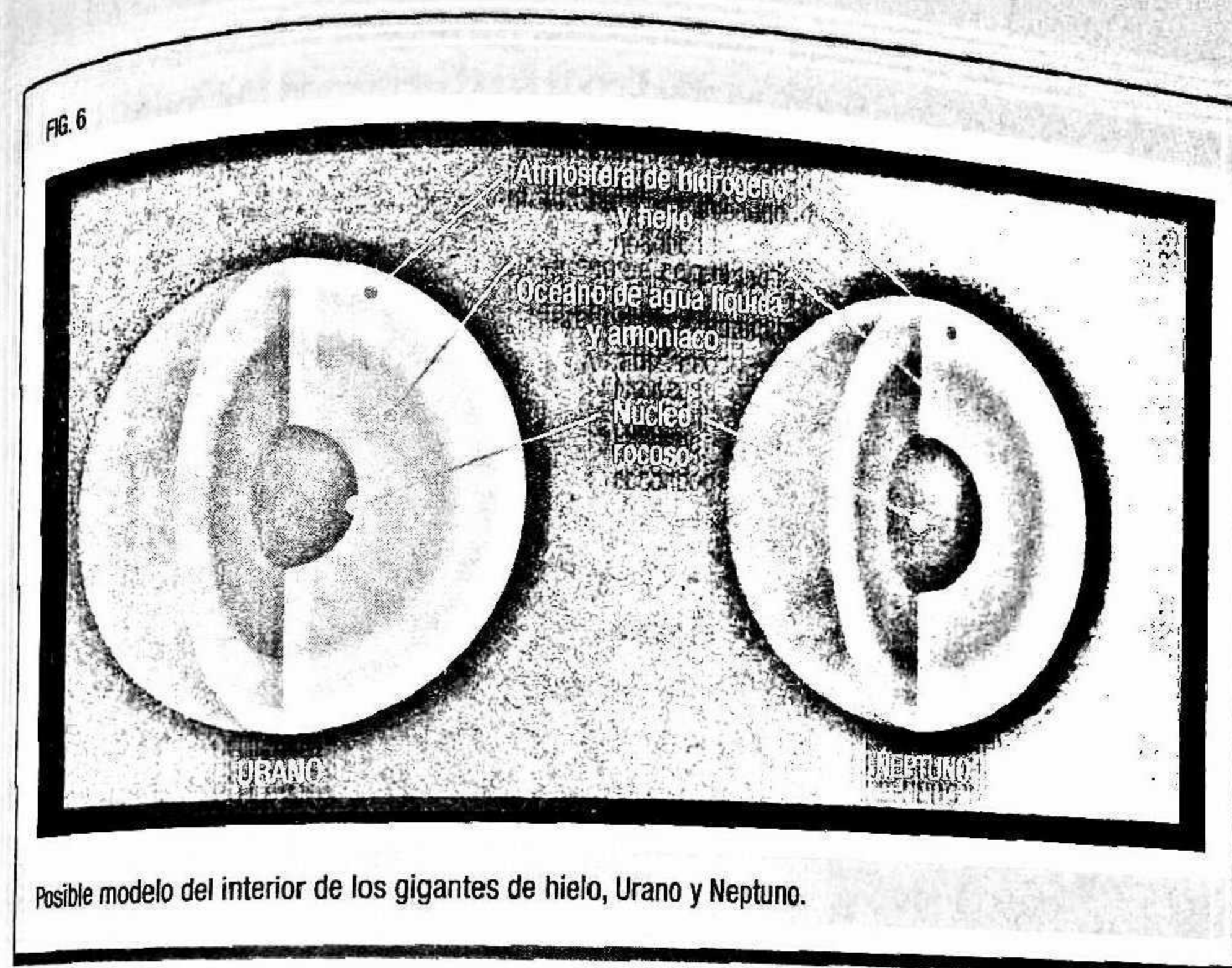
Antes de la llegada de la Voyager, ya se conocían otras propiedades de Urano, como su masa, su tamaño, e incluso la composición y temperatura de su atmósfera. Esta última se había inferido a

partir de la radiación infrarroja emitida por el planeta, encontrándose un valor de -214°C , apenas 59 grados por encima del cero absoluto. Esto hace de Urano el planeta más frío del sistema solar. Esta bajísima temperatura es consecuencia de la lejanía del planeta respecto al Sol, pero también de la ausencia de una fuente de calor interno. A diferencia de Júpiter y Saturno (y, como veremos, de Neptuno), que emiten mucha más radiación de la que reciben del Sol, en el caso de Urano, apenas el 30% de la radiación emitida procede de su interior, correspondiendo el resto a la radiación reflejada del Sol. Ello sugiere que el planeta ha perdido buena parte del calor acumulado durante su formación, que se supone tuvo lugar en condiciones similares a las de los otros planetas externos. A día de hoy, se desconoce la razón de este rápido enfriamiento.

Como en los otros planetas gaseosos, la atmósfera de Urano está compuesta fundamentalmente de hidrógeno molecular y helio. El tercer componente es el metano (CH_4), el cual supone apenas un 2% de las moléculas presentes en la atmósfera. Sin embargo, es el responsable del color azul-verdoso del planeta, ya que este compuesto absorbe la mayor parte de la radiación roja, y refleja los tonos azules y verdes, que son los que observamos desde el exterior. La temperatura de la parte alta de su atmósfera es tan baja que el metano es capaz de condensarse y formar nubes. Se cree que por debajo de la capa nubosa de metano Urano debe albergar otras capas de nubes similares a las de Júpiter y Saturno, con un estrato más alto de nubes de cristales de amoníaco, otro intermedio de hidrosulfuros de amonio y uno más bajo de vapor de agua.

La densidad media del planeta es considerablemente mayor que las de Júpiter y Saturno. Esto sugiere que Urano posee menor cantidad de gas y una mayor concentración de elementos pesados, tales como agua, amoníaco y metano. Dada la baja temperatura del planeta, estos elementos pesados se encontrarían en forma de hielo. Esta característica, que comparte con Neptuno, hace que estos dos planetas sean también conocidos como los «gigantes de hielo» (figura 6).

A partir de los datos obtenidos mediante las observaciones terrestres y por la sonda Voyager, tales como la temperatura, el calor irradiado por el planeta o su densidad, los científicos han



Posible modelo del interior de los gigantes de hielo, Urano y Neptuno.

intentado hacerse una idea de su estructura y composición interna. Uno de los modelos propuestos considera que el planeta posee tres capas diferenciadas: un núcleo central rocoso pequeño, el mencionado manto de hielo y, finalmente, una cubierta gaseosa de hidrógeno y helio. La atmósfera correspondería a una fina capa de esta cubierta gaseosa. La temperatura del núcleo se ha estimado en unos 5000°C , menor que la del núcleo de la Tierra (unos 7000°C). La presión, en cambio, sería aproximadamente el doble de la del núcleo terrestre, unos ocho millones de atmósferas. En estas condiciones extremas, el hielo del manto no tendría una textura rígida, sería más bien una pasta fluida, una especie de océano de agua y amoníaco. Se ha especulado que este océano interior podría contener grandes cantidades del diamante, en forma de lluvia o de iceberg, resultante de la disociación del CH_4 y la condensación de carbono. El hecho de que el interior de Urano (y, también, de Neptuno) sea tan diferente al de Júpiter y de Saturno desafía la teoría ampliamente aceptada de un origen común. Algunos científicos han sugerido que Urano y Neptuno se formaron en

una fase más tardía, cuando buena parte de la nebulosa original ya había desaparecido, atrapada por sus hermanos mayores.

Las primeras fotografías enviadas por la sonda Voyager 2 en 1986 transformaron las difusas imágenes terrestres en una bella y nítida estampa de un color azul-verdoso. Algo que llamó la atención de los científicos fue su aspecto homogéneo, sin apenas variaciones de tonalidad y sin manchas u otras perturbaciones, muy diferente del vistoso y colorido manto de Júpiter. La sonda fue capaz de detectar la presencia de nubes de metano, pero no las de amoníaco, quizá porque estas se encuentran a mucha mayor profundidad. La aparente ausencia de tormentas podría estar relacionada con la menor energía interna del planeta, lo que inhibiría los movimientos de convección y daría lugar a una atmósfera más estable. No obstante, también se ha apuntado que la neblina de metano que cubre por completo el planeta podría ocultar la posible actividad meteorológica de las capas más bajas. Para responder a estas y otras preguntas, la NASA y la ESA estudian actualmente la posibilidad de enviar nuevas sondas al planeta, que incluirían un módulo de descenso como el que ya se utilizó en Júpiter. El lanzamiento no sería antes de mediados de la década de 2020. Teniendo en cuenta los 15 años del trayecto, de momento deberemos conformarnos con los datos de la veterana Voyager, y con las observaciones realizadas desde la Tierra o desde satélites y telescopios espaciales.

En cuestión de vientos, Urano se parece bastante a la Tierra, a pesar de que en su día los planetólogos estaban ansiosos por recibir las mediciones de Voyager, esperando que la anómala oblicuidad del planeta produciría un sistema de vientos muy diferente al de los otros planetas. Durante el paso de la sonda Voyager, cuando el polo sur del planeta apuntaba directamente al Sol, el ecuador debía estar en un crepúsculo constante, y el polo norte en total oscuridad. El calor recibido en el polo sur sería distribuido al resto del planeta por los vientos, con lo que los científicos esperaban encontrar corrientes viajando de un polo al otro, y un esquema de vientos diferente para cada hemisferio. Por el contrario, se encontraron con un sistema de vientos de este y oeste (ver figura 2), iguales para ambos hemisferios y sorprendentemente parecidos a los terrestres. Parece que, aunque el motor

último de estos vientos se encuentra en la radiación solar, su distribución en el planeta viene gobernada casi exclusivamente por la rotación del planeta y la consecuente fuerza de Coriolis.

NEPTUNO, DIOS DE LOS MARES... Y DE LOS VIENTOS

El planeta Neptuno no es visible a simple vista. Su descubrimiento se produjo en 1846, poco después de ser predicha su existencia por el entonces estudiante de matemáticas y astronomía británico John Couch Adams (1819-1892) y el astrónomo francés Urbain Le Verrier (1811-1877). De manera independiente, ambos estudiaron los aparentes desajustes en el movimiento de Urano y lo atribuyeron correctamente al efecto gravitatorio de un planeta desconocido, llegando a calcular su posición con exactitud. Este hallazgo es considerado por muchos como uno de los mayores logros de la mecánica newtoniana.

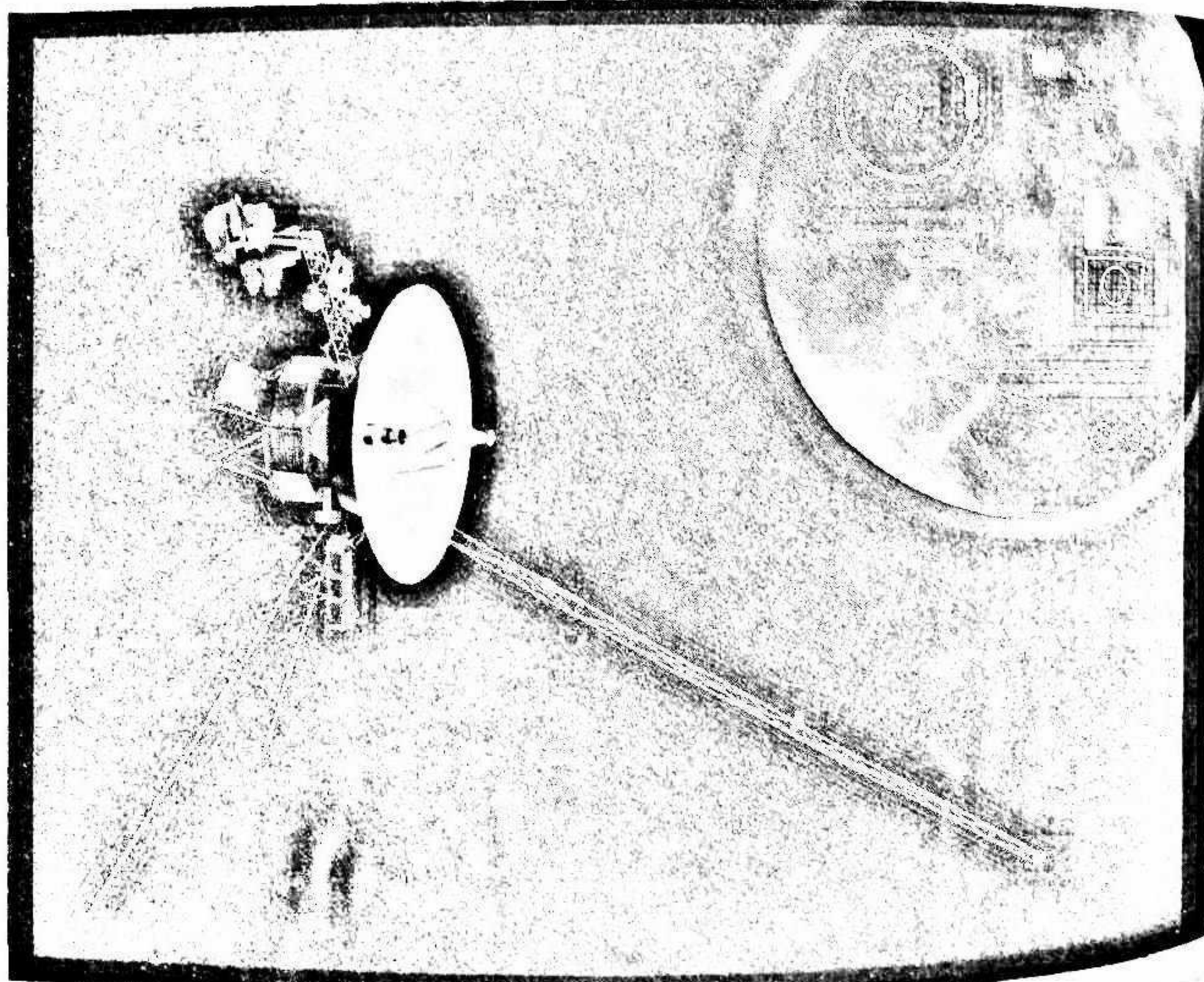
Neptuno guarda notables similitudes con Urano, tanto en su tamaño, su apariencia externa y su composición interior, pero se encuentra mucho más alejado del Sol. En nuestro sistema solar en miniatura, con la Tierra a un metro del Sol, Urano orbitaría a 20 metros y Neptuno a una treintena. Invierte nada menos que 165 años en darle una vuelta al Sol, lo cual quiere decir que, desde que fue descubierto, el planeta ha completado poco más de una órbita. Debido a su enorme distancia al Sol recibe 1000 veces menos luz que la Tierra y el disco solar se vería unas 30 veces más pequeño. A partir de la radiación infrarroja emitida por el planeta, se ha estimado que la temperatura de la parte superior de su atmósfera es de unos 214 °C bajo cero, curiosamente, casi idéntica a la de Urano. Parece que Neptuno, al igual que Júpiter y Saturno, debe poseer una potente fuente interna de calor.

WILLIAM HERSCHEL

Lo vemos (al invisible y probable nuevo planeta Neptuno) como Colón vio América desde la costa de España. Sus movimientos se han notado, vibrantes a lo largo de la línea de largo alcance de nuestros análisis, con una certeza algo inferior a la de una demostración ocular.

LAS PRIMERAS MISIONES A LOS PLANETAS EXTERIORES

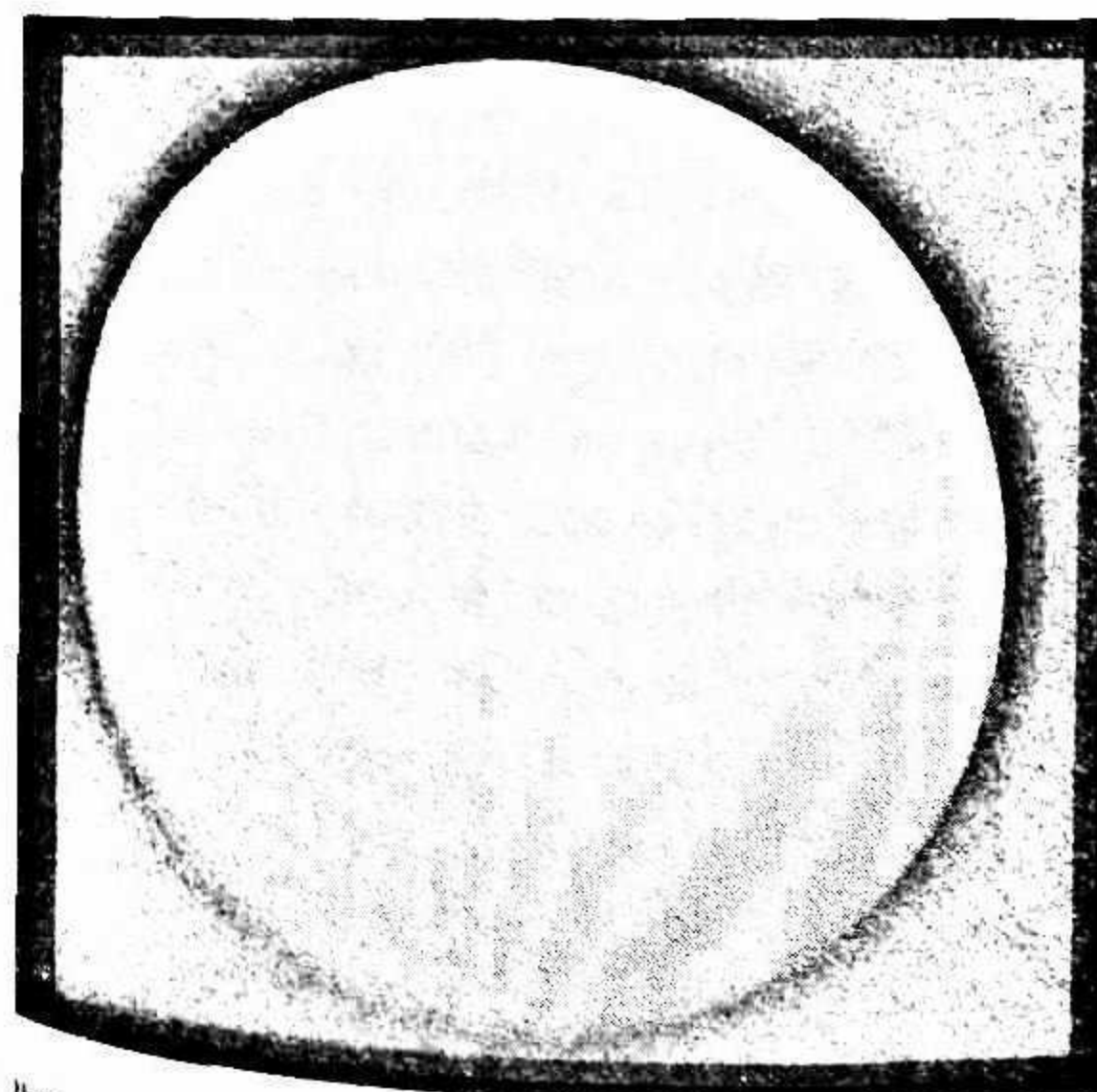
La exploración de los planetas exteriores mediante ingenios no tripulados se inició en la década de 1970 con la misión de las sondas norteamericanas Pioneer 10 y 11. Estas nos proporcionaron las primeras fotografías de cerca del planeta Júpiter, durante su encuentro en 1973. En 1983, Pioneer 10 se convertía en el primer ingenio en alcanzar la órbita de Plutón. En 1977, las sondas gemelas Voyager 1 y 2, enviaron imágenes del planeta y de sus lunas de mucha mejor calidad y resolución que las de sus antecesoras. Además, captaron las hasta entonces desconocidas erupciones volcánicas del satélite Ío y descubrieron dos desconocidos y tenues anillos de Júpiter compuestos por una miríada de partículas diminutas. Tras abandonar Júpiter y recorrer un millón de kilómetros diarios, un año después llegaban a Saturno. Las imágenes de los anillos dejaron atónitos a los científicos, que no esperaban tantísima complejidad y cantidad. Uno de sus hallazgos más llamativos fue el descubrimiento de auroras polares, similares a las terrestres. La trayectoria de Voyager 1 se ajustó para sobrevolar Titán, la mayor luna de Saturno, y analizar de cerca su densa atmósfera, alejándose posteriormente del plano de la órbita de los planetas y concluyendo así su misión científica.



Sonda Voyager y el disco de oro *Sonidos de la Tierra*, una compilación de imágenes y sonidos que acompaña a cada una de las sondas.

La Voyager 2 escudriña Urano y Neptuno

Por su parte, Voyager 2 continuó su camino rumbo a Urano y Neptuno (en la imagen izquierda y derecha, respectivamente), donde llegó en 1986 y 1989, respectivamente. Sus descubrimientos también fueron revolucionarios. En Urano, distinguió unos tenues anillos y un cinturón de radiación donde electrones y protones se movían agitadamente atrapados por el campo magnético del planeta. Fotografió las superficies de sus lunas mayores y descubrió una decena de nuevas lunas. En 1990, los ingenieros giraron las cámaras para tomar la primera fotografía del sistema solar desde el exterior, en la que se aprecian los diferentes planetas, incluida la Tierra, ese «punto azul pálido» al que se refirió Sagan. Tras esta foto de familia, se decidió apagar las cámaras para ahorrar energía y memoria. Pero la misión continúa hasta nuestro día. Viajando a una velocidad de unos 17 km por segundo, en 2012 la sonda atravesaba la heliopausa, la frontera entre el viento solar y el espacio interestelar. Las sondas portan dos discos de gramófono fabricados en oro (ver imagen a la izquierda), con sonidos e imágenes que retratan la diversidad de la vida y la cultura en la Tierra. La probabilidad de que sea interceptado por una hipotética civilización extraterrestre es ínfima (¡Voyager 1 tardará 10 000 años en alcanzar la estrella más próxima en su trayectoria!), pero se trata de un gesto simbólico, una especie de «botella lanzada al inmenso océano cósmico», en palabras de Sagan. A la misión Voyager le han seguido otras. En 1989 partía a Júpiter la misión Galileo, que incluía un módulo de descenso que se adentró en la atmósfera de Júpiter. En 1997, la Cassini-Huygens, una misión doble que incluía el descenso de Huygens a Titán y la puesta en órbita de Saturno de Cassini, donde ha permanecido desde entonces. También Júpiter posee su satélite artificial, Juno, que orbita el planeta desde 2016.



Urano (izquierda) fue explorado por primera vez en 1986 por la Voyager 2, la cual visitó Neptuno (derecha) en 1989.



La oblicuidad de este planeta es de 28°C , algo mayor que la de la Tierra, y similar a la de Saturno. Esto hace que posea larguísima estación de verano en el hemisferio sur, de manera que la temperatura de este polo es unos 10°C más alta que la del resto del planeta.

La composición de la atmósfera de Neptuno es similar a la de Urano: contiene fundamentalmente hidrógeno y helio, una pequeña fracción de metano y trazas de otros hidrocarburos. La presencia de metano confiere a la atmósfera un color azul, similar al de Urano pero más intenso, muy apropiado para un planeta que fue bautizado como «rey de los mares». Sin embargo, a diferencia de su hermano, la atmósfera de Neptuno muestra una agitada actividad, contrariamente a lo que cabría esperar de un planeta que apenas recibe luz solar. También posee una distribución de vientos zonales sorprendentemente parecida a la de la Tierra (figura 2), con corrientes casi permanentes de este a oeste en la zona ecuatorial y tropical, similares a nuestros alisios, y otra corriente a latitudes más altas a cada lado del ecuador, como las corrientes de chorro. Sin embargo, estos vientos son mucho más veloces que los terrestres, pudiendo superar los 1000 km/h . Además, a diferencia de la Tierra, la temperatura de la atmósfera apenas cambia del ecuador a los polos, quizá porque los movimientos de convección debidos al calor interno del planeta reparten de manera eficiente el calor por toda su superficie.

Fruto de esta actividad atmosférica son también las constantes formaciones nubosas. Entre ellas, destacan unas brillantes nubes blancas, similares en aspecto a los cirros terrestres, que se forman por encima de las otras capas de nubes y consisten en cristales de hielo de metano. Durante el encuentro con la Voyager 2, que pasó a menos de 5000 km del planeta en 1989, tenía dos grandes manchas, bautizadas como la Gran Mancha Negra y la Pequeña Mancha Negra. La primera, de un diámetro superior al de la Tierra, parece ser una gran tormenta, con unos feroces vientos de más de 2000 km/h que no tienen igual en el sistema solar. El origen de esta gran tormenta y del resto de actividad en la atmósfera de Neptuno parece hallarse en la diferencia de temperatura entre su interior y la atmósfera.

El clima de las lunas

Nuestra Luna es sin duda un mundo inhóspito, árido e inerte. Pero no ocurre igual con el resto de satélites naturales del sistema solar. Algunos son mundos con una inusitada actividad volcánica, con atmósfera y, posiblemente, con mares interiores de agua que escapa al exterior en forma de géiseres.

Desde la Antigüedad, la Luna ha ejercido una fascinación especial sobre el ser humano. Su resplandor, solo superado por el del Sol que la ilumina, sus fases cambiantes o sus eclipses han sido objeto de estudio en todas las civilizaciones. Ya en el siglo V a.C., el filósofo griego Anaxágoras dedujo correctamente que la Luna no emitía luz propia, sino que esta era el resultado de la reflexión de la luz solar. A esta misma conclusión llegaron otras culturas, como la china de la dinastía Han (200 a.C.-200 d.C.) o la india en el siglo V d.C. El greco-egipcio Ptolomeo (siglo II d.C.) concluyó que el satélite se encontraba a unos 59 radios terrestres y su radio era 0,292 veces menor, valores sorprendentemente próximos a los que conocemos hoy día (60 radios y 0,273 veces menor). Aunque la idea de la Luna como un cuerpo esférico era ampliamente aceptada en la Edad Media, la mayoría creía que su superficie era completamente lisa. La situación cambió cuando Galileo dirigió su telescopio hacia el satélite en 1609 y descubrió su relieve accidentado, cubierto de cráteres y montañas. En ese mismo siglo, otros astrónomos comenzaron a cartografiar su superficie, bautizando las zonas oscuras como «maria» (mares, en latín) y las claras como «terra», alimentando la creencia

popular de la existencia de agua líquida y continentes. En 1753, el astrónomo y jesuita croata Ruder Josip Bošković concluyó, observando la ocultación de las estrellas tras el satélite, que la Luna carecía de atmósfera lo que, entre otras cosas, eliminaba la posibilidad de agua líquida en su superficie pues, en ese caso, esta se evaporaría inmediatamente en el vacío. A pesar de ello, la posibilidad de que la Luna poseyera vegetación e incluso estuviera habitada por selenitas fue sostenida por reputados astrónomos hasta comienzos del siglo XIX.

A mediados del siglo XIX empezaron a hacerse los primeros intentos de medir la temperatura de la superficie lunar mediante el análisis de la radiación infrarroja. Estas primeras estimaciones no fueron muy precisas, en parte por lo rudimentario de los instrumentos empleados y también por no conocerse lo suficiente la física de la radiación. Cuando se mejoró la parte técnica (por ejemplo, con la invención del bolómetro en 1878, un instrumento que mide la energía de radiación electromagnética que procede de un objeto) y la matemática, se alcanzaron valores en torno a los 100 °C en la zona iluminada por el Sol. Más compleja fue la determinación de su temperatura en las partes no iluminadas. A principios de la década de 1920, los astrónomos estadounidenses Edison Pettit (1889-1962) y Seth Nicholson (1891-1963) llevaron a cabo las primeras observaciones de la radiación infrarroja emitida por objetos celestes, y fueron ellos los que, observando un eclipse lunar, arrojaron luz al respecto: en el transcurso de las horas que duró el eclipse, la temperatura cayó de unos 70 °C a -98 °C.

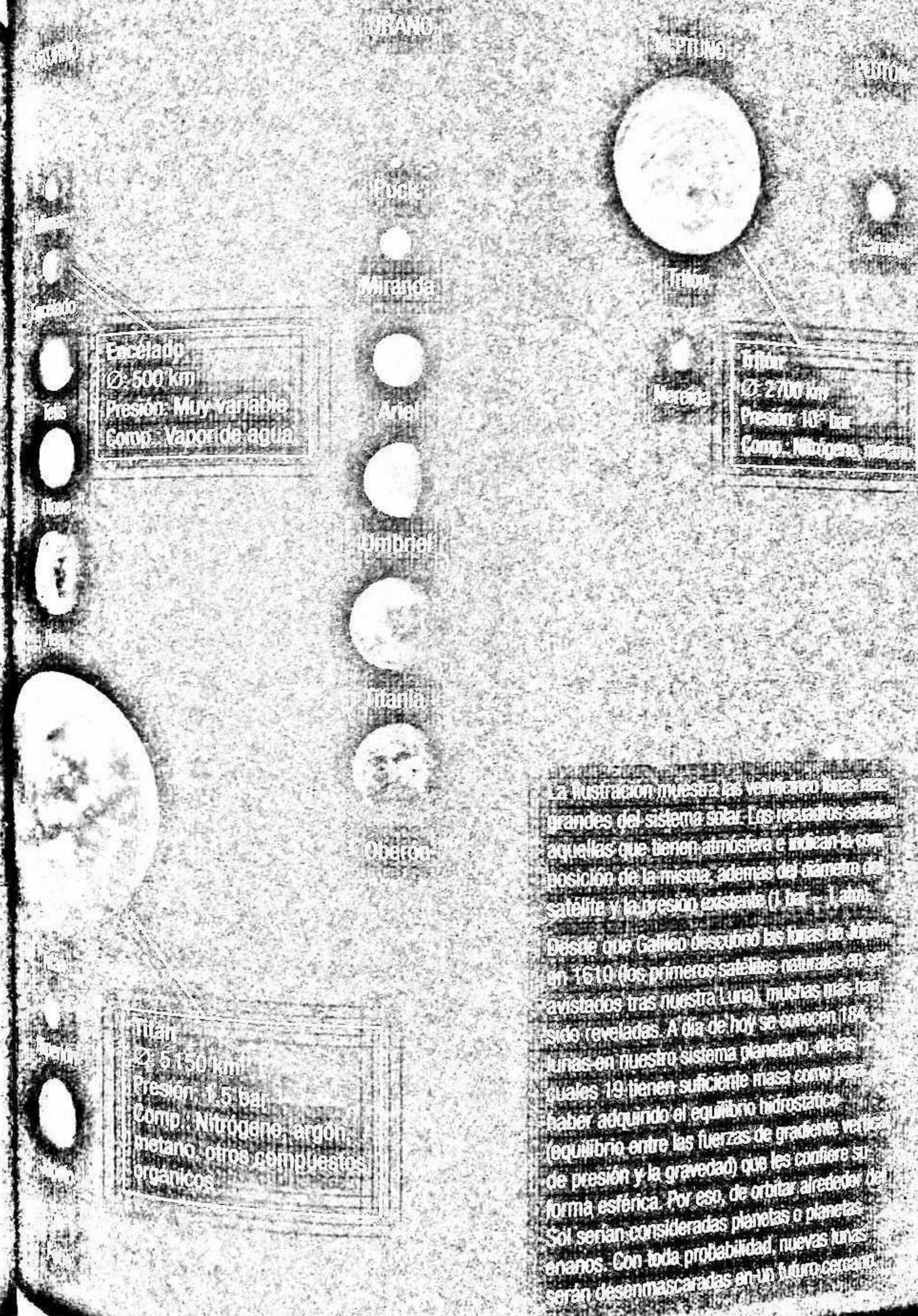
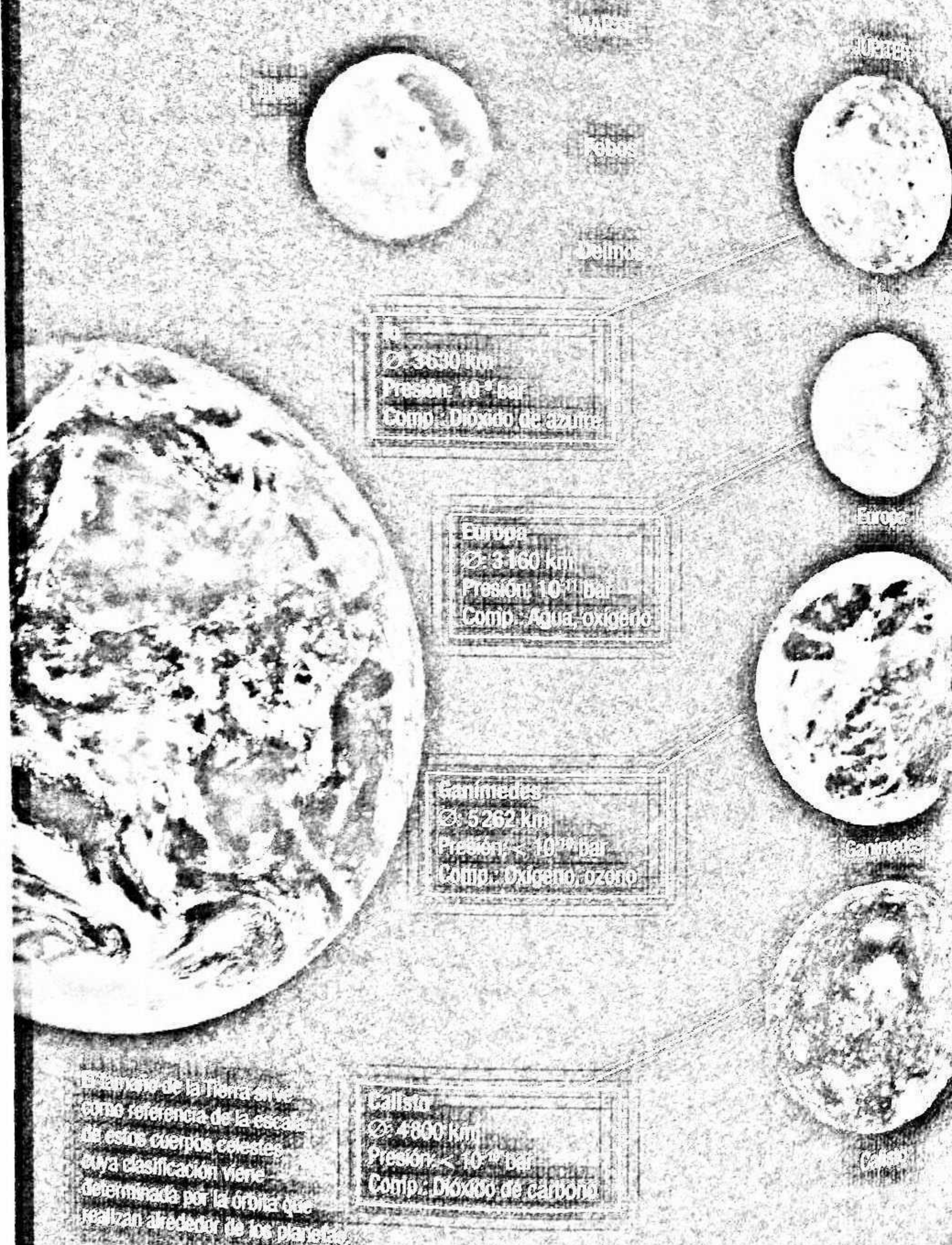
Las medidas más modernas dan valores entre 127 °C y -173 °C para las zonas de luz y de oscuridad. Ya vimos que estas fuertes oscilaciones son una consecuencia de la ausencia de mares y de atmósfera, capaces de retener y distribuir el calor en ausencia de luz directa. Pero ¿por qué la Luna, que se encuentra en la misma zona del sistema solar que la Tierra, carece de atmósfera? El que un planeta o su satélite natural consigan retener en su atmósfera un cierto tipo de molécula dependerá de la velocidad con que se muevan las moléculas en comparación con la llamada *velocidad de escape* del planeta. Esta última va ligada a la masa

del planeta (a mayor masa, mayor atracción gravitatoria sobre las moléculas y, por tanto, mayor será la velocidad de escape). La velocidad de las distintas moléculas difiere, pero todas siguen una determinada distribución de probabilidades, con una cierta velocidad promedio que depende de la temperatura (a mayor temperatura, más agitación térmica y mayor velocidad promedio) y de la masa de dichas moléculas (cuanto más pesadas, más lentamente se moverán). Este problema fue estudiado en detalle por el científico y escritor británico James Hopwood Jeans (1877-1946), quien estimó que, para que un astro (planeta o luna) consiga retener un determinado tipo de molécula, debe ocurrir que la velocidad media de las mismas sea, como mucho, 1/6 de la velocidad de escape de dicho astro. La velocidad de escape de la Luna es unas cinco veces menor que la de la Tierra, lo que se traduce en que solo las moléculas más pesadas, como las de los gases argón y neón, sean retenidas. A esto hay que añadir que en la Luna, al contrario que en nuestro planeta, no hay actualmente actividad volcánica que restituya los gases que se pierden. Además, el efecto de barrido del viento solar es allí mucho más intenso debido a la ausencia de campo magnético.

Nuestra Luna es uno de los más de 150 satélites naturales que orbitan en torno a los planetas de nuestro sistema solar (ver los más grandes en las páginas 108 y 109). Casi todas estas lunas acompañan a los planetas exteriores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno), y en los planetas interiores hay pocas: la Tierra tiene una, Marte solo dos y Mercurio y Venus carecen de ellas. Claramente, el enorme campo gravitatorio de los planetas gigantes les permitió atrapar estos objetos en los albores del sistema solar. Únicamente Júpiter y Saturno acaparan más de 50 lunas cada uno, sin contar otros cuantos candidatos que esperan confirmación oficial.

Entre esta numerosa cohorte de satélites, existe toda una variedad de tamaños, formas y morfologías. La mayoría consiste en objetos rocosos, formados a partir de la misma nebulosa primigenia de gas y polvo que dio lugar también a los planetas. Las dos lunas marcianas, Fobos y Deimos, son objetos pequeños e irregulares, tan pequeños, que no fueron descubiertos hasta mediados del siglo XIX. Ambos carecen de atmósfera y de agua.

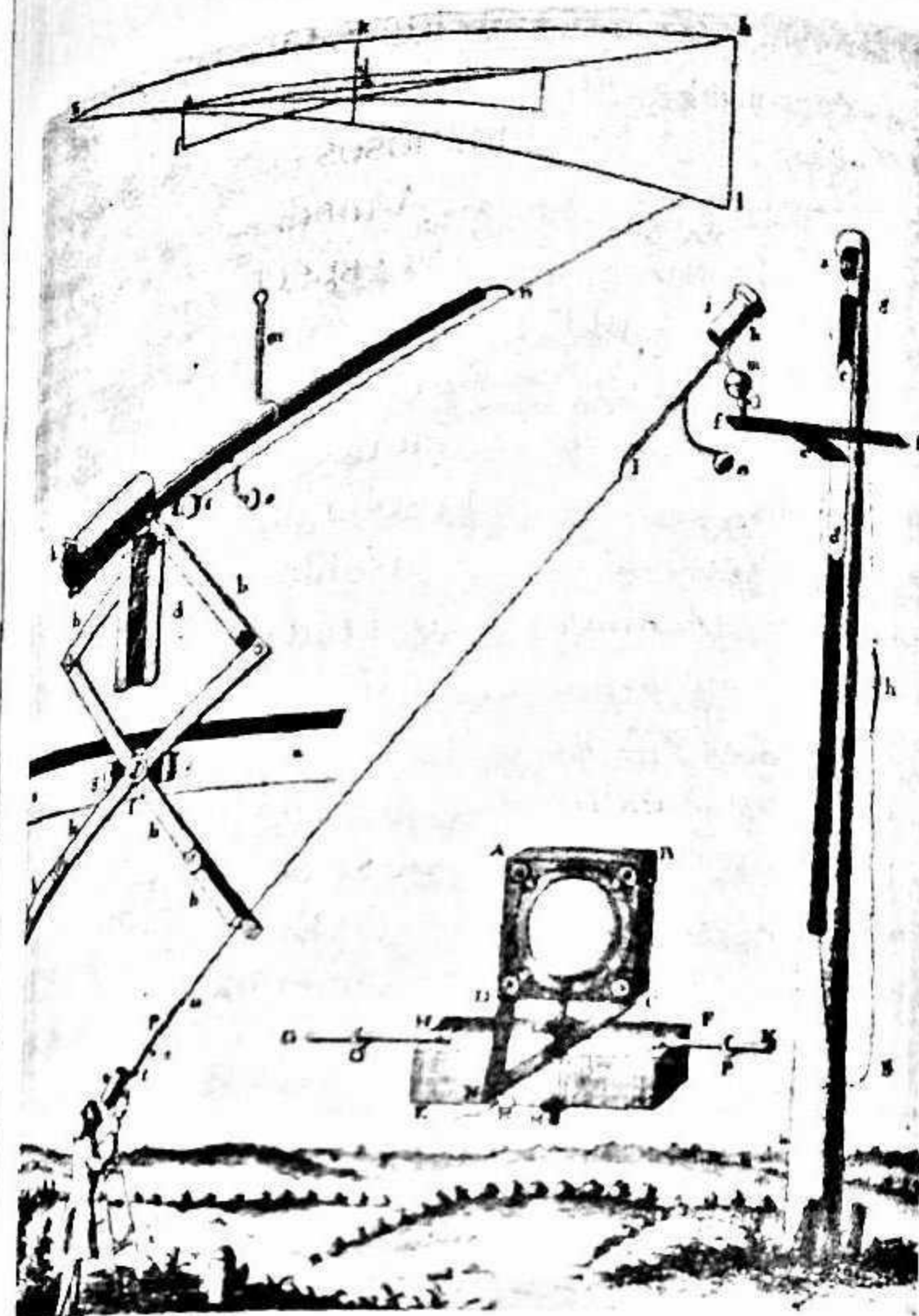
LAS LUNAS MAS GRANDES DEL SISTEMA SOLAR



En cuanto a las lunas de los planetas exteriores, tardaron mucho en atraer la atención de los científicos. Incluso las mayores de ellas no pasaban de pequeños puntos luminosos con los telescopios disponibles a comienzos del siglo xx. A mediados de dicho siglo, empezaron a obtenerse los primeros espectros de radiación de las principales lunas de Júpiter y Saturno, gracias a los cuales se empezó a tener una idea de su composición. Pero el verdadero avance llegó con las misiones Pioneer y Voyager que, en su larga travesía a lo largo del sistema solar, nos fueron descubriendo su fisonomía y algunas de sus insólitas propiedades, como la intensa actividad volcánica de Ío, la blanca superficie helada de Encélado, los géiseres que brotan de los mares interiores de Europa o la bruma que envuelve a Titán. A estas misiones les han seguido otras, como la exitosa Cassini-Huygens, que nos permitió descubrir la red de ríos y lagos que se ocultaban bajo la bruma de Titán y la fuentes hidrotermales de Encélado. Pero... ¿cómo debe ser el clima de estos singulares mundos?

TITÁN: LA LUNA QUE QUISO SER UN PLANETA

Con un diámetro de algo más de 5000 km, Titán es la mayor luna de Saturno y la segunda del sistema solar, más grande que Mercurio y solo un poco más pequeña que Marte. Fue descubierta en 1665, por Christiaan Huygens quien, recordemos, también descubrió los anillos de Saturno. Esto fue posible gracias al telescopio que había fabricado junto a su hermano, empleando una nueva técnica para el pulido de lentes desarrollada por ambos. El resultado fue un telescopio de más de cuatro metros de longitud (ver imagen en la parte superior de la página contigua), un verdadero portento tecnológico para la época con el que, no obstante, fue incapaz de apreciar el más mínimo detalle de su superficie. Titán no era más que un puntito de luz que giraba en torno a Saturno, empleando 16 horas en cada giro. Durante los siguientes 200 años, el único descubrimiento significativo fue la determinación de su masa, calculada en la década de 1880 por el estadounidense George William Hill (1838-1914) a partir de la perturbación que



A la izquierda, telescopio construido por Huygens, con el que descubrió los anillos de Saturno y su mayor luna, Titán. Abajo, dibujo de Titán realizado en 1907 por el astrónomo Josep Comas i Solà y publicado en 1908 en la revista *Astronomische Nachrichten* (izquierda), comparado con una imagen del satélite capturada por la sonda Cassini (derecha).



provocaba en la órbita de otro satélite de Saturno, Hiperión. Esta resultó ser casi dos veces mayor que la de nuestra luna.

En 1907, el astrónomo español Josep Comas i Solà (1868-1937) estudió el satélite con el telescopio de 38 cm de abertura del Observatorio Fabra de Barcelona. Al publicar estos resultados, junto al dibujo realizado por él mismo (ver imagen inferior izquierda en la página 111) hacía notar que el satélite mostraba un oscurecimiento de su borde (un fenómeno conocido como *oscurecimiento del limbo*), lo que interpretó como un claro indicio de la presencia de atmósfera.

Dados los medios empleados por Comas i Solà, muchos expertos pusieron (y ponen) en tela de juicio que fuera posible distinguir el borde difuso de un objeto tan pequeño y distante como Titán, a pesar de las reconocidas y excepcionales dotes visuales del astrónomo. Pero en 1944 el astrofísico de origen neerlandés Gerard Kuiper (1905-1973) anunciaba un importante hallazgo que parecía darle la razón; había conseguido identificar las bandas de absorción de metano (el principal componente del gas natural) en el espectro de radiación del satélite, lo que parecía ser una prueba inequívoca de la presencia de una atmósfera rica en este hidrocarburo. Sin embargo, aún cabía la posibilidad de que este metano estuviera en estado sólido o líquido y fuera realmente parte de la superficie. La confirmación definitiva de la existencia de atmósfera en Titán llegó finalmente en 1980, cuando la sonda Voyager pasó a menos de 5000 km del satélite. Sus medidas corroboraron la existencia de una envoltura gaseosa, así como la presencia de metano, pero, contrariamente a lo esperado, este gas constituía menos del 2% de la atmósfera. La mayor parte consistía en nitrógeno molecular (N_2) que, curiosamente, es también el principal componente de la atmósfera terrestre. Al final, resultó que aquel pequeño y gélido mundo situado a 1500 millones kilómetros de nosotros era más parecido a nuestro planeta de lo que nadie había podido imaginar.

Las imágenes enviadas por la cámara de la sonda estadounidense se revelaron además que Titán está envuelto en una capa de neblina de color anaranjado, lo que impedía distinguir el más mínimo detalle de su superficie. La luna saturnal se mostraba una vez más esquiva ante la curiosidad humana. Aunque decepcionante, este

hecho no era totalmente inesperado. En la década de 1970, los astrofísicos Carl Sagan y su colega indio Bishun Khare intentaron

imaginar cómo sería una atmósfera rica en metano, como la que supuestamente tenía Titán. Para ello, realizaron una serie de experimentos en los que bombardearon una muestra rica en gas metano con radiación ultravioleta y electrones energéticos, simulando la radiación y el viento solar. Observaron que la muestra se transformaba en una sustancia de color marrón-rojizo a la que denominaron *tholin* (del griego, tollina, que significa «fangoso»).

El *tholin* no se corresponde con un

determinado compuesto, sino más bien con una mezcla de compuestos de carácter orgánico que se forman a partir de una cadena de reacciones químicas que tiene lugar cuando la luz ultravioleta o partículas cargadas de alta energía disocian o ionizan las moléculas de nitrógeno y metano. La bruma observada por la sonda Voyager bien podía consistir en esta mezcla de *tholin*.

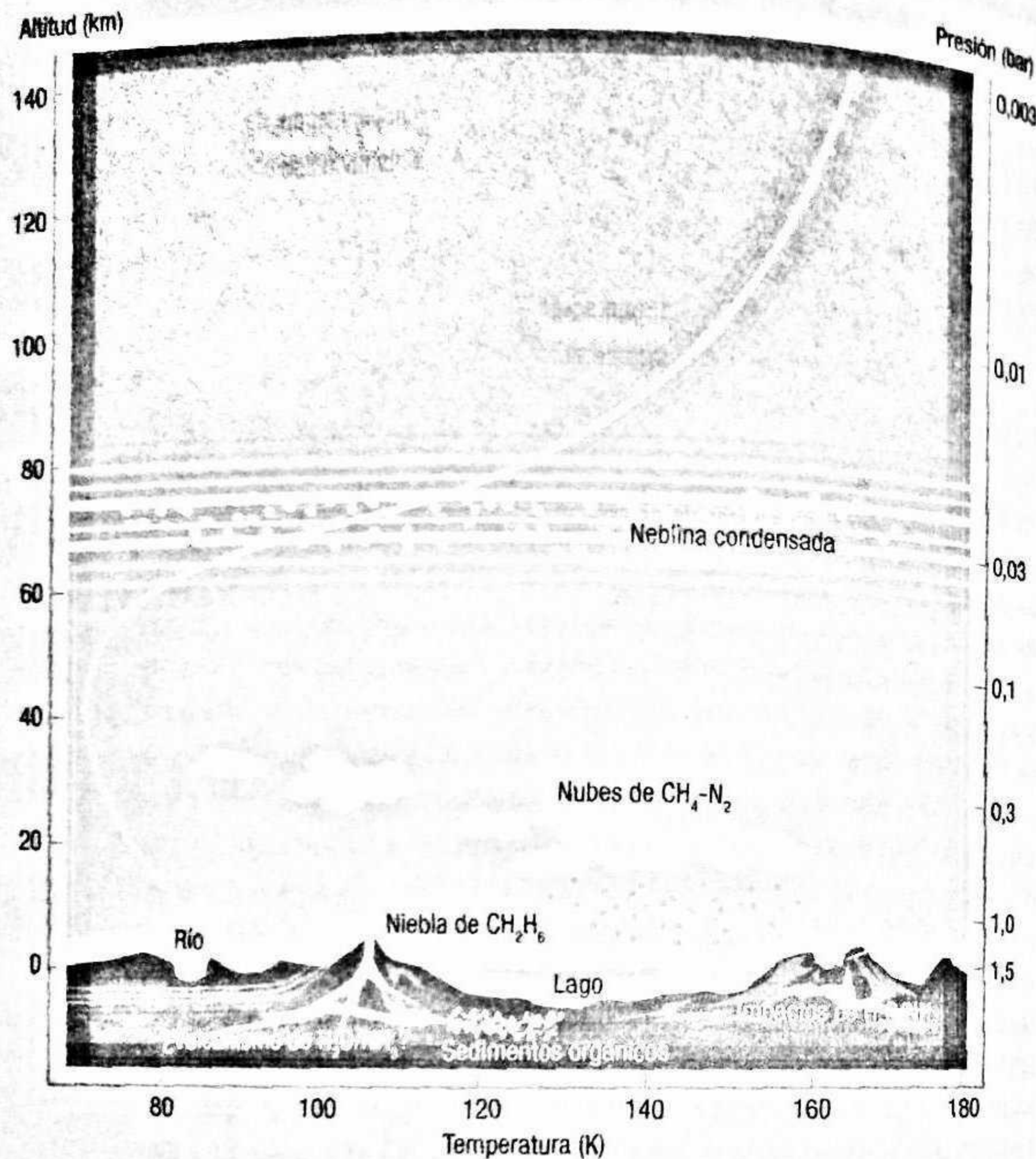
Gracias a las medidas de la sonda Cassini, hoy sabemos que la bruma de Titán está compuesta por una gran variedad de hidrocarburos, como etano, benceno o antraceno, y otras macromoléculas orgánicas mucho más pesadas. Estas moléculas, producidas por la acción de la luz solar sobre el metano, van aglomerándose en granos cada vez mayores, hasta caer sobre la superficie, formando grandes depósitos sólidos de hidrocarburos. Como este proceso ha podido desarrollarse a lo largo de cientos de millones de años, se cree que deben existir también grandes reservas de metano líquido en el subsuelo que quizá terminen emanando por actividad volcánica o algún otro mecanismo desconocido, restableciendo así el metano que se pierde de la atmósfera (ver figura 1).

La existencia de atmósfera en Titán es en sí un hecho notable. De acuerdo con el trabajo de James Jeans, al que ya nos hemos referido, para que un planeta o luna retenga un determinado tipo de molécula, la velocidad de escape de dicho objeto debe ser

En Titán puede que todavía se conserven las moléculas que han estado lloviendo del cielo como maná durante los últimos cuatro mil millones de años, completamente inalteradas, congeladas, aguardando la llegada de los químicos de la Tierra.

CARL SAGAN

Fig. 1



La figura muestra la estructura y composición de la superficie de Titán y de su atmósfera entre los 0 y 140 kilómetros de altura.

unas seis veces mayor que la velocidad medida de las moléculas. Ya vimos que Mercurio, algo más pequeño que Titán, carece casi por completo de envoltura gaseosa. Incluso Marte, que es mayor que Titán, posee una atmósfera mucho más tenue. ¿Cómo

ha conseguido Titán retener su considerable envoltura gaseosa? La explicación, ofrecida por Jeans en 1925, es que, debido a su enorme distancia al Sol, Titán recibiría muy poca radiación solar y las moléculas de su atmósfera se moverían muy despacio, de manera que podría retener partículas pesadas como argón, neón, nitrógeno o metano. La referencia de Jeans al caso de Titán no es casual, ya que menciona que se tenía constancia de la existencia de su atmósfera pero, lamentablemente, no cita ninguna fuente. ¿Se referiría a la controvertida observación de Comas i Solà?

El ciclo «metanológico» de Titán

Otra razón por la cual la atmósfera de Titán ha cautivado a los científicos planetarios es su similitud con nuestra propia atmósfera. No solo el componente principal en ambas es el nitrógeno sino que, además, la presión atmosférica también es similar. A diferencia de la Tierra, en Titán no hay oxígeno, porque este está ligado a los procesos biológicos que se desencadenaron en nuestro planeta hace miles de millones de años. Por otro lado, el clima terrestre y la existencia de vida están fuertemente vinculados al agua y al ciclo hidrológico. Casi tres cuartas partes de nuestro planeta están cubiertas de agua. El calentamiento solar evapora el agua de mares, océanos y del propio suelo. Este vapor de agua se eleva y, al enfriarse, da lugar a precipitaciones, ya sea en forma de agua, nieve o granizo, que alimentan los ríos y corrientes subterráneas y que, finalmente, devuelven el agua al mar. La temperatura de nuestro planeta es la justa para que puedan darse estos procesos, ya que permite la existencia de agua en sus tres estados, sólido, líquido y gas.

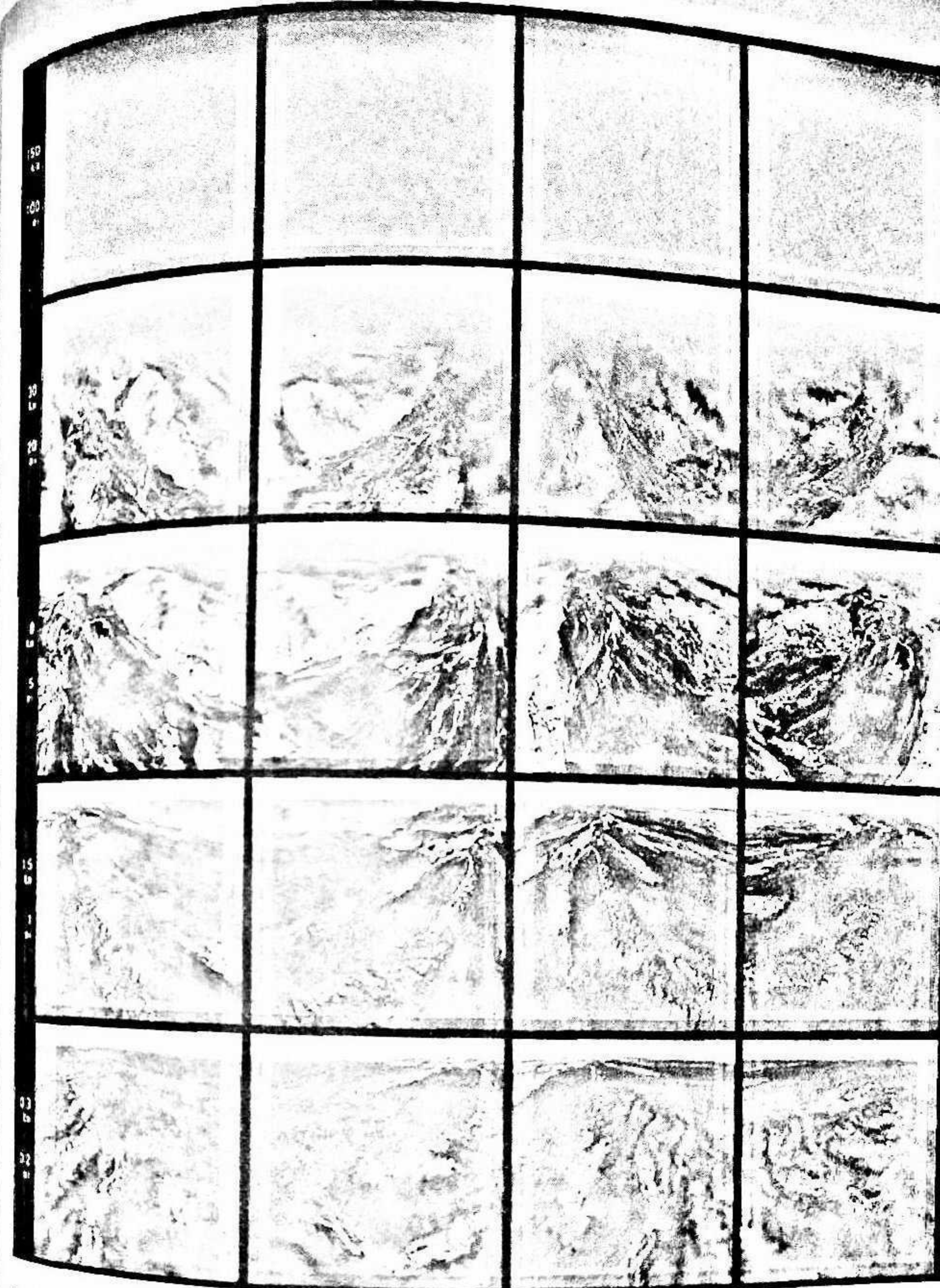
La temperatura de Titán (-180°C) imposibilita la existencia de agua líquida, al menos en su superficie. Sin embargo, esta temperatura permite la existencia de metano en sus tres fases. La presencia de este gas en su atmósfera había sido probada por Gerard Kuiper y posteriormente corroborada por la sonda Voyager. La existencia de lagos o mares de metano líquido y otros hidrocarburos era plausible y fue confirmada gracias a la misión Cassini-Huygens. El metano de la atmósfera jugaría un

EXPLORACIÓN DE TITÁN

Tras las observaciones realizadas en 1907 por el astrónomo catalán Josep Comas i Solà, sugiriendo la existencia de una envoltura gaseosa en Titán, y la identificación en 1944 de líneas de absorción de metano por parte de Kuiper, los científicos planetarios comenzaron a mostrar gran interés por esta luna de Saturno. Prueba de ello es que, en 1980, cuando los científicos de la misión Voyager 1 tuvieron que decidir entre desviar el rumbo de la sonda hacia Titán, o bien aprovechar el impulso de Saturno para continuar su viaje a Plutón, se decantaron por la primera opción. El sacrificio mereció la pena. Además de confirmar la existencia de una gruesa atmósfera y la presencia de metano y otros hidrocarburos, la Voyager 1 descubrió que la mayor parte de la atmósfera consiste en nitrógeno molecular (N_2), tal y como ocurre en la Tierra. A pesar de ello, las imágenes enviadas fueron algo decepcionantes, ya que solo mostraban una especie de «pelota de tenis difusa», como la calificaron los científicos de la misión, cubierta por una espesa bruma que no permitía atisbar el más mínimo detalle de su superficie.

El tándem Cassini-Huygens revela el misterio

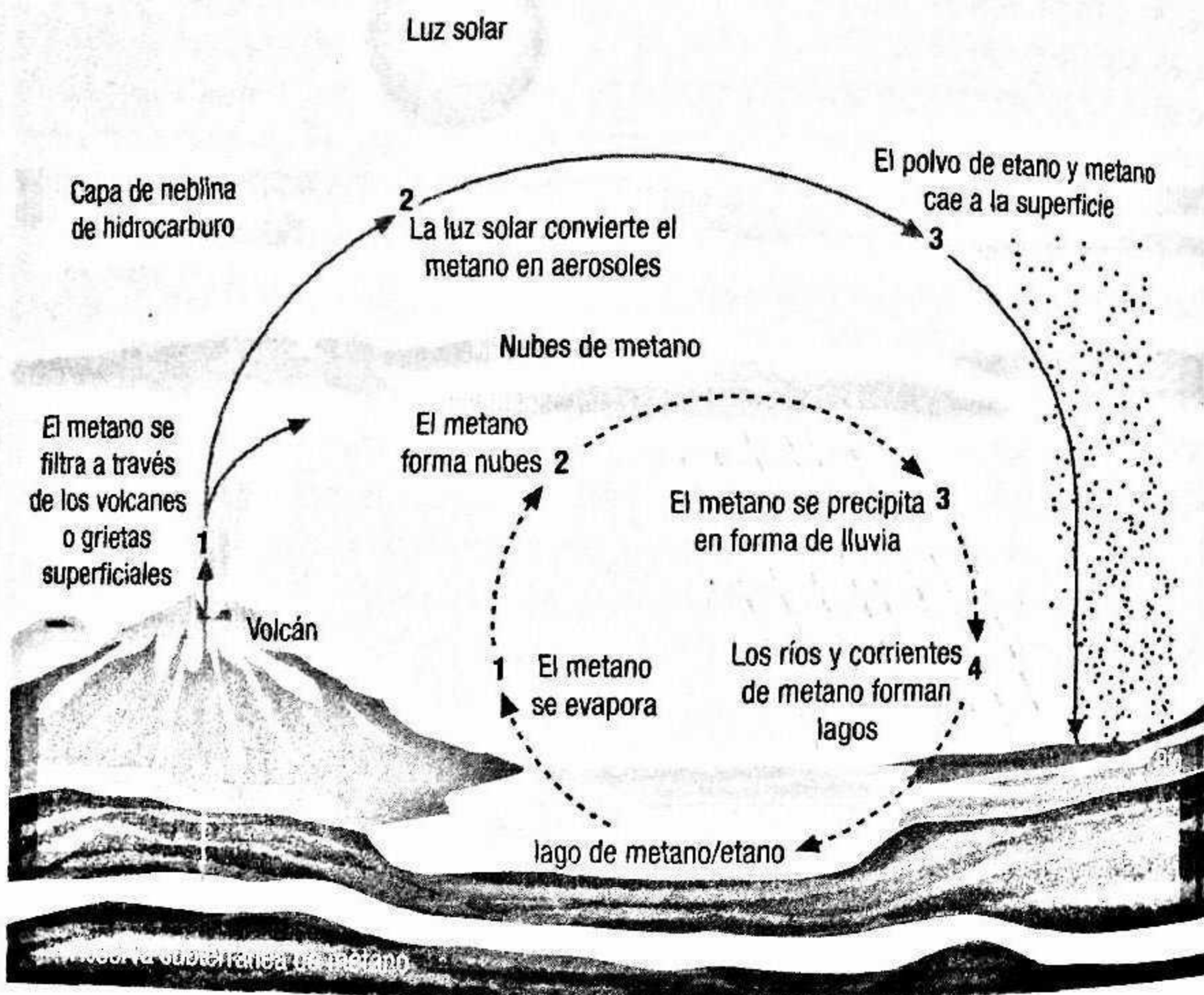
El satélite consiguió mantener celosamente guardados los secretos de su apariencia hasta que en 2005 la sonda Huygens marcó un nuevo hito de la exploración espacial al posarse sobre su superficie. Era la culminación de un largo viaje de siete años, realizado en compañía de la sonda Cassini. La pareja fue lanzada en 1997 en una misión conjunta de las agencias espaciales estadounidense, la NASA, y europea, ESA. Poco después de entrar en la órbita de Saturno, el módulo Huygens se despidió de su compañero de viaje, dirigiéndose a Titán. Asistido por un paracaídas, Huygens realizó un descenso de 2,5 horas a través de la atmósfera del satélite, a la vez que enviaba datos a Cassini, que a su vez los retransmitía a la Tierra. Tras tocar tierra, la sonda siguió enviando datos y fotografías durante media hora más, antes de agotar su batería. Son las únicas fotografías que disponemos hasta hoy de la superficie del satélite (ver imagen). El alunizaje se produjo en tierra firme en una zona aparentemente árida pero con numerosos indicios de erosión producida por torrentes de agua y cauces fluviales secos. Además, encontró indicios de la existencia de un posible océano de agua líquida a unos 45 km de profundidad. La sonda Huygens tiene el honor de ser el ingenio humano que ha protagonizado el aterrizaje más lejano hasta la fecha, y el único realizado en el sistema solar exterior. Entretanto, su compañera de viaje Cassini ha continuado en la órbita de Saturno, estudiando el planeta y sus lunas. Sus imágenes de radar sirvieron para detectar por primera vez la formación de nubes en Titán y su disipación en forma de lluvia, permitiendo además la elaboración de una verdadera cartografía de su superficie e identificar sus lagos. Aunque en septiembre de 2017 la misión Cassini llegará a su fin, la exploración de Titán no acabará aquí. La NASA estudia la posibilidad de enviar vehículos submarinos que puedan sumergirse en sus lagos de hidrocarburos, analizar su composición e incluso buscar algún indicio de vida. El destino que más interesa es el cuerpo líquido más grande del norte de Titán, el mar del Kraken, de unos 1 000 km de longitud y profundidades estimadas de 300 m, algo así como el mar Caspio.



En la imagen, sucesivas tomas aéreas de Titán tomadas por la sonda Huygens en las inmediaciones del lugar donde aterrizó en 2005.

papel análogo al del vapor de agua que, al condensarse, formaría nubes de gotitas de metano. Estas nubes dan lugar a lluvias de metano, que alimentarían los ríos y lagos captados por Cassini. Debido a la escasa radiación solar que alcanza la superficie de Titán (1000 veces menos que la que llega a la superficie terrestre) la evaporación sería muy lenta, con lo que se cree que el clima de Titán experimenta largos periodos de calma o incluso de sequía, de años o incluso siglos, interrumpidos por lluvias torrenciales de metano, conformando una especie de «ciclo metanológico», como algunos científicos lo han bautizado (figura 2).

FIG. 2



El metano experimenta un ciclo de cientos de años (línea discontinua), similar (aunque más lento) al ciclo hidrológico de la Tierra. Se cree que experimenta también un proceso más lento (de millones de años), en el que el metano emana de las reservas interiores a la atmósfera, donde se va destruyendo debido a la luz solar (línea continua).

¿Vida en Titán?

En la Tierra, la vida está fuertemente ligada al agua, hasta el punto que se cree que fue en los primigenios océanos donde esta pudo surgir. Como acabamos de mencionar, el metano juega en muchos aspectos un papel similar en Titán al del agua en la Tierra. Entonces ¿podría Titán albergar vida? Las condiciones del satélite parecen demasiado adversas para que así sea. La temperatura ronda los 180°C bajo cero, recibe 100 veces menos de luz solar que la Tierra y, debido a la opaca bruma que lo cubre, la cantidad de luz que alcanza la superficie es aún menor. Sin embargo, aunque en la Tierra muchas especies dependen directamente de la fuente de energía solar, se han descubierto también numerosas formas de vida primitivas que no requieren de luz solar. Un ejemplo son los llamados *litótrofos*, un grupo de microorganismos que habitan en las profundidades oceánicas, en ausencia de luz, que obtienen sus nutrientes del hidrógeno, metano y otros compuestos producidos en reacciones químicas que tienen lugar debido a la actividad volcánica.

Los hipotéticos organismos que pudieran existir en Titán dispondrían de un medio líquido en el que desenvolverse y abundante energía en forma de hidrocarburos. La ausencia de oxígeno tampoco sería un obstáculo insalvable. Algunos científicos han teorizado sobre la posibilidad de que existan células constituidas por compuestos de nitrógeno, que no requieran de oxígeno ni de agua, y sean capaces de funcionar en un medio de metano líquido y sometidas a las temperaturas de Titán.

10: LA LUNA DE FUEGO

Io es uno de los cuatro satélites de Júpiter descubiertos por Galileo en 1610, y el más interior de todos ellos. Durante tres siglos y medio, los satélites galileanos no fueron más que pequeños puntos de luz, cuyos discos eran apenas discernibles incluso a través de los mejores telescopios.

Antes del acercamiento de las sondas no tripuladas Pioneer y Voyager, ya se habían encontrado indicios que sugerían que lo

¿QUÉ CONDICIONES HACEN FALTA PARA RETENER UNA ATMÓSFERA?

Los átomos y moléculas que componen la atmósfera de un planeta o una luna están en continuo movimiento debido a su energía térmica. Estas partículas están sujetas a la acción de la fuerza gravitatoria, que hace que se muevan describiendo trayectorias parabólicas o balísticas (como las de un proyectil). De acuerdo con las leyes de Newton, para que un objeto sometido a la fuerza de la gravedad consiga escapar al espacio exterior su velocidad debe superar un cierto valor crítico, conocido como velocidad de escape, dado por:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

donde G es la constante de gravitación universal, M la masa del planeta y R su radio. En la tabla adjunta, se muestran las velocidades de escape de algunas lunas y planetas.

	Velocidad de escape (km/s)
Luna	2,4
Titán	2,6
Mercurio	4,3
Marte	5,0
Tierra	11,2
Júpiter	59,5

La velocidad de las partículas, al ritmo de la constante de Boltzmann

Para un gas a una cierta temperatura, no todas las partículas se mueven con la misma velocidad, sino que obedecen a una cierta distribución de velocidades, con un valor promedio dado por la expresión:

$$v_m = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

siendo m la masa de la partícula, k la llamada *constante de Boltzmann* y T la temperatura. A mayor temperatura, mayor agitación térmica y, por tanto, mayor velocidad media. Esto hace que una fracción mayor de las partículas del gas alcance la velocidad de escape, aumentando la probabilidad de que se pierdan en el espacio. Como regla aproximada, un planeta consigue retener un cierto átomo o compuesto si la velocidad de escape es unas seis veces mayor que la velocidad media de estas moléculas. Por ejemplo, para una molécula de oxígeno (O_2) a $20^\circ C$ se obtiene una velocidad media de $0,48$ km/s mientras que para una molécula de hidrógeno (H_2), a la misma temperatura, se obtiene $v_m = 1,9$ km/s. El campo gravitatorio de la Tierra, cuya velocidad de escape es de unos 11 km/s, es capaz de retener el oxígeno, pero no el hidrógeno. Esta teoría fue desarrollada en detalle por James Jeans en su monografía *Teoría dinámica de los gases*, publicada en 1904.

poseía características muy diferentes a las de los otros satélites galileanos. Las imágenes de infrarrojo realizadas a comienzos de los años setenta desde la Tierra indicaban que, mientras que Ganímedes y Europa poseían superficies muy reflectantes y con claras señales de hielo, en Ío no parecía haber indicios de agua.

Apenas tres días antes de que la sonda Voyager 1 hiciera su aproximación en 1979, los científicos estadounidenses Stanton Peale, Patrick Cassen y Ray Reynolds publicaron un interesante trabajo en el que anticipaban que, debido al efecto combinado de las fuerzas gravitatorias de Júpiter y de los otros satélites galileanos (especialmente Europa), Ío estaría sometido a una intensa «fuerza de marea», similar a la que la Luna ejerce sobre los mares y océanos terrestres. Esto ocurriría cuando Ío se situara justamente entre Júpiter y el satélite Europa. La atracción de este último tendería a sacar a Ío de su órbita circular, lo cual lo alejaría ligeramente de Júpiter. El efecto es muy pequeño pero, dado la enorme fuerza gravitatoria de Júpiter, sería suficiente como para comprimir y estirar al satélite, elevando su superficie cientos de metros. La fricción originada por estos movimientos continuados produciría el calentamiento del satélite. Según los autores del trabajo, la energía liberada sería equivalente a unas 2 400 toneladas de TNT por segundo, suficiente como para derretir parte del interior del planeta y producir abundantes erupciones volcánicas. La confirmación no tardó en llegar. Tres días después de la publicación de estos resultados, la sonda Voyager comenzaba a enviar las primeras fotografías de Ío en las que el satélite nos mostraba por primera vez su superficie de tonos amarillo miel, rojos y naranjas, salpicada de numerosas manchas oscuras (ver imágenes de la página 125). En una de las fotografías se observaba una especie de nube en forma de paraguas que se elevaba a gran altura sobre su superficie. Los científicos tenían ante sus ojos una gigantesca erupción volcánica. Por otro lado, midiendo la intensidad de la radiación infrarroja en diferentes puntos de la superficie, se descubrió que las manchas negras correspondían a «puntos calientes» con temperaturas de hasta $250^\circ C$, mientras que en

el resto de la superficie era tan solo de -140°C . Claramente, estas zonas negras correspondían a emanaciones de lava del interior. Este escenario encajaba sorprendentemente bien con las predicciones de Peale, Cassen y Reynolds.

Aunque las imágenes de las Voyager proporcionaron las primeras evidencias del vulcanismo en Ío, nuestro conocimiento actual de este fenómeno se debe en gran parte a las medidas posteriores realizadas desde los modernos telescopios terrestres, así como a las misiones Galileo, Cassini y New Horizons. Gracias a estas observaciones continuadas se han identificado cientos de cráteres volcánicos. Las erupciones dan lugar a extensos ríos de lava de roca basáltica, al tiempo que lanzan ingentes cantidades de azufre y dióxido de azufre (SO_2) a gran presión, formando plumas que se alzan decenas o cientos de kilómetros sobre la superficie. Estos puntos calientes pueden alcanzar temperaturas superiores a los 1000°C pero, al entrar en contacto con el frío vacío circundante, la lava solidifica rápidamente. También los gases de azufre expulsados tienden a solidificarse y depositarse en su superficie, lo que le da el color y el aspecto característico al satélite. El SO_2 que no solidifica, o pasa a formar parte de la tenue atmósfera de Ío o bien consigue escapar del satélite, arrastrado por el intenso campo magnético de Júpiter y formando una especie de cola que lo acompaña en su movimiento alrededor de Júpiter, dando lugar a un curioso anillo.

Ío está considerado el objeto geológicamente más activo de todo el sistema solar. El mayor de sus volcanes, bautizado como Loki, libera más material que el conjunto de todos los volcanes de la Tierra juntos. Para alimentar toda esta actividad volcánica, se cree que el interior de Ío contiene un mar subterráneo de azufre líquido que emerge a la superficie por esos «puntos calientes».

Como colofón, mencionamos un curioso fenómeno descubierto en 2016. Una vez al día, Júpiter se interpone entre Ío y el Sol, eclipsando al satélite durante unas dos horas. Esto hace caer de forma repentina la temperatura en Ío unos 35°C , lo que es suficiente como para que el SO_2 de la atmósfera se deposite en forma de escarcha que, tras el eclipse, vuelve a evaporarse. De este modo, la tenue atmósfera de Ío desaparece durante dos horas cada día.

LUNAS QUE OCULTAN VASTOS OCÉANOS

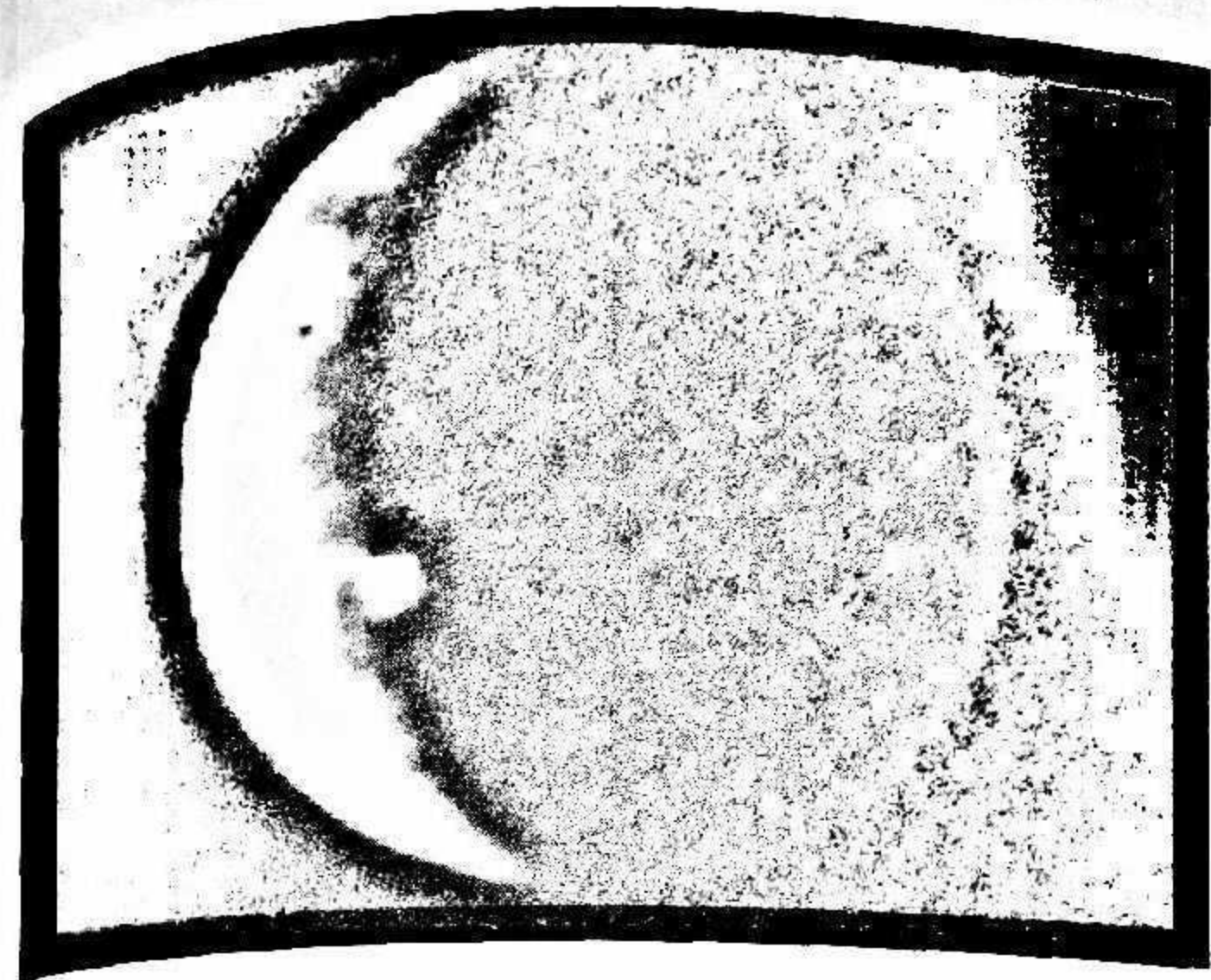
La superficie cubierta de lava y parcheada de Ío contrasta con la de los otros satélites galileanos. Por ejemplo, las imágenes enviadas por la sonda Voyager 2 del satélite Europa, el segundo en distancia a Júpiter, nos descubrieron una superficie lisa y brillante, carente de elevaciones o depresiones, apenas interrumpida por una serie de surcos o grietas de color rojizo (ver imagen superior izquierda en la página 127). De hecho, este satélite es probablemente el objeto más liso y menos accidentado de todo el sistema solar. El análisis espectroscópico de la radiación reflejada por el satélite mostró que su corteza está compuesta esencialmente por hielo. En 2013, el telescopio espacial Hubble detectó lo que parecían ser emanaciones de vapor de agua, similares a los géiseres terrestres. El hallazgo fue acogido con gran entusiasmo por parte de la comunidad científica, porque mostraba que el satélite era geológicamente activo y que poseía reservas de agua líquida en su interior. De hecho, se cree que a unos 100 km de profundidad bajo la dura costra helada yace un océano interior de agua líquida.

¿Cómo es posible la existencia de agua líquida, en un planeta cuya temperatura superficial oscila entre los -160°C en el ecuador y los -220°C en los polos? Según los modelos matemáticos, la explicación estaría en el calentamiento producido por el efecto de marea causado por Júpiter, similar al que experimenta Ío, aunque de menor intensidad. Este efecto produciría, por un lado, el calentamiento del agua interior y, por otro, contribuiría a formar grietas y fracturas en la superficie, por las que tendería a salir el agua a gran presión. Las implicaciones podrían ir mucho más allá, ya que es concebible suponer que el satélite posee actividad hidrotermal, la cual podría proporcionar las condiciones de temperatura y nutrientes necesarias para la existencia de vida. Este tipo de condiciones se han observado en algunos lugares de la Tierra, como el lago Vostok, un lago subglacial situado a unos cuatro kilómetros bajo el hielo antártico, en el que se han encontrado evidencias de la existencia de vida microbiana.

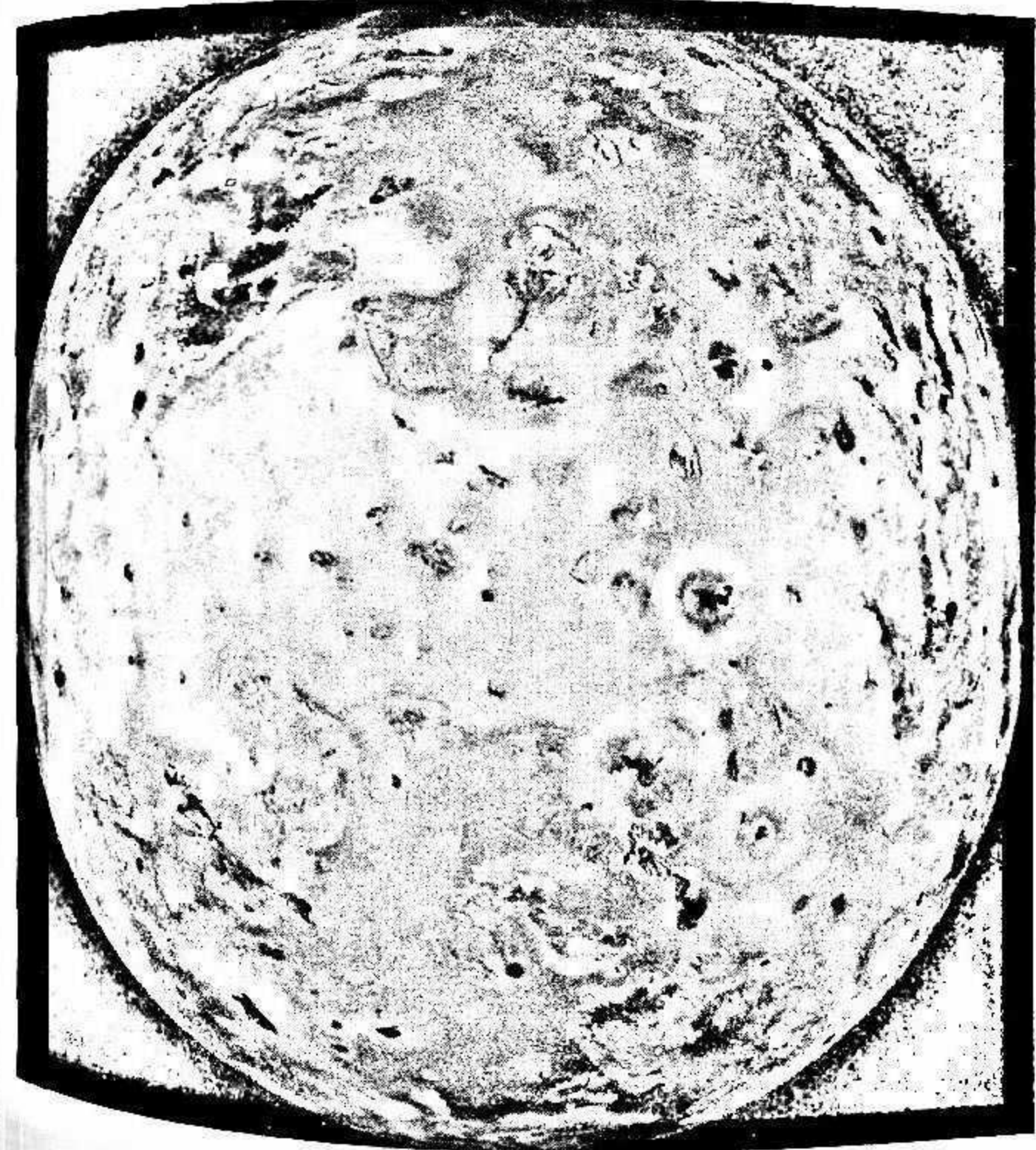
El caso del satélite Europa no es único. Ganímedes, el siguiente satélite galileano en distancia a Júpiter, también es un firme

candidato para albergar agua líquida en su interior. Ostenta el honor de ser el mayor satélite de nuestro sistema solar. Es mayor que Mercurio y que Plutón, y solo algo más pequeño que Marte. Si orbitara en torno al Sol, en lugar de alrededor de Júpiter, merecería la consideración de planeta. Su superficie cubierta de cráteres le confiere un aspecto similar al de nuestra Luna. Pero la similitud es engañosa, ya que estos cráteres, al igual que el resto de la superficie de este gran satélite natural, están compuestos fundamentalmente de hielo. A diferencia de Europa, donde se han observado directamente las emanaciones de vapor de agua en forma de géiser, en Ganímedes la evidencia es solo indirecta. Esta llegó gracias a una técnica innovadora. Ganímedes posee su propio campo magnético capaz de producir, como en la Tierra, auroras polares. Debido a la cercanía del potente campo magnético de Júpiter, estas auroras se desplazan pero, aparentemente, no lo hacen tanto como cabría esperar en caso de que fuera rocoso y sólido en su interior. Una explicación posible es la existencia de un segundo campo magnético, creado en el hipotético océano del satélite, que contrarrestaría al campo externo de Júpiter. A partir de estas y otras evidencias indirectas los científicos creen que Ganímedes alberga un océano interior con una cantidad de agua mayor que la de todos los océanos terrestres juntos. Aunque no se descarta completamente, los científicos ven poco probable la existencia de actividad biológica en el océano de Ganímedes, pues se halla completamente sellado en el interior del planeta.

Un caso completamente diferente es el de Encélado, una pequeña luna de Saturno de apenas 500 km de diámetro descubierta en 1789 por William Herschel, apenas unos meses después del estallido de la Revolución francesa. Debido a su pequeño tamaño había pasado prácticamente desapercibida hasta el paso de las sondas Voyager en 1980, cuyas imágenes descubrieron un bellissimo objeto de color blanco muy reluciente. Este color se debe a la composición de su superficie, de hielo casi puro, que le confiere el mayor poder reflejante de todos los objetos del sistema solar, similar al de la nieve recién caída. Como no absorbe apenas radiación solar, la temperatura de su superficie es de tan solo -201°C . A pesar de ello, tras el paso de las sondas los cien-



A la izquierda, una de las primeras imágenes de Io, tomada por la sonda Voyager 1 en 1979. Fue la primera vez que se observó su vulcanismo. Abajo, esta imagen compuesta por varias tomas generadas en 1996 por la sonda Galileo muestra la orografía de la cara oculta del satélite.



Sabemos ahora que Encélado tiene casi todos los ingredientes necesarios para albergar vida como la conocemos en la Tierra.

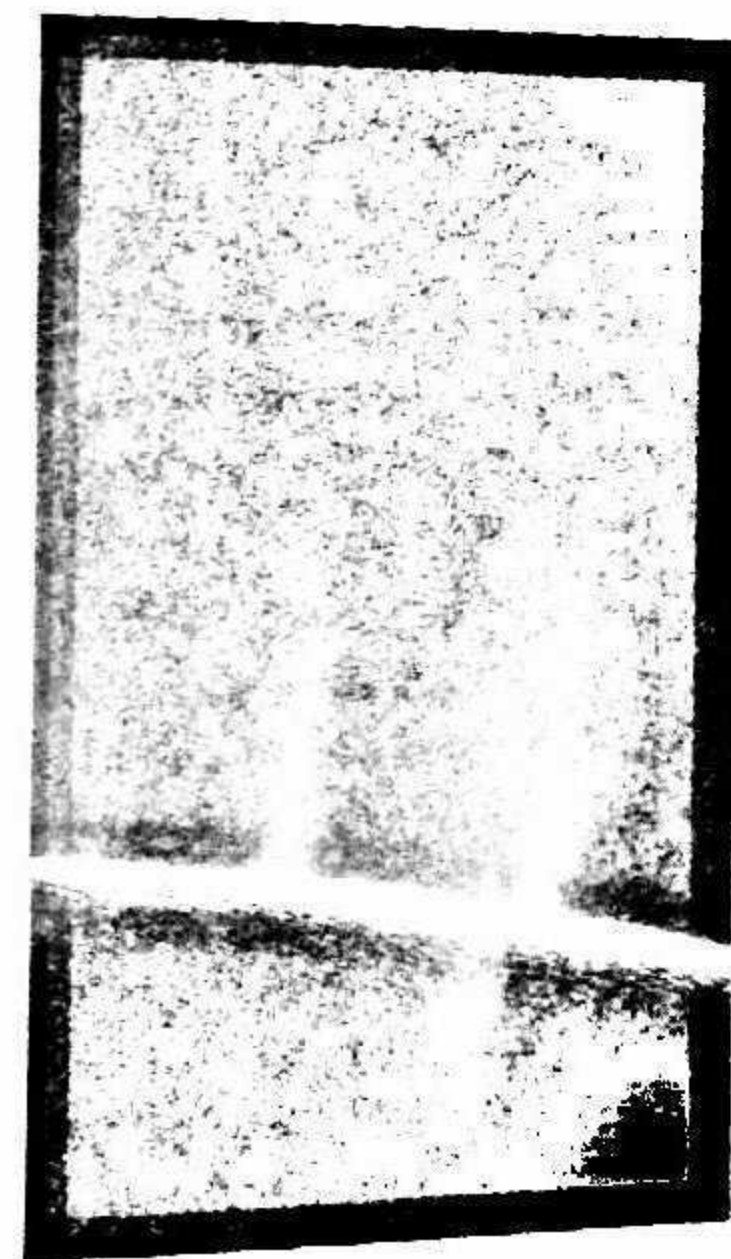
LINDA SPILKER, MIEMBRO DEL EQUIPO CIENTÍFICO DE LA MISIÓN CASSINI.

tíficos sospecharon que Encélado podría contener grandes reservas de agua líquida en su interior, gracias al calor provocado por los movimientos de marea resultantes de la poderosa atracción gravitatoria de Saturno, de forma similar a lo que ocurre con los satélites jovianos. La confirmación llegó de la mano de la sonda Cassini que, en 2005, captó plumas de vapor de agua expulsadas por el planeta (ver imagen inferior derecha en página contigua). Estas erupciones parecen ocurrir de forma continua en el satélite, cubriendo su superficie de forma permanente y envolviéndolo en una especie de halo de hielo en polvo. Además, parte del polvo escapa al espacio exterior, dando

lugar al llamado anillo E de Saturno. En otro de sus encuentros, Cassini llegó a sobrevolar la superficie de Encélado a tan solo 50 km de altitud, pasando a través de una de sus plumas, lo que permitió descubrir que, además de vapor de agua, contenía amoníaco, dióxido de carbono, hidrógeno molecular y varios hidrocarburos, como metano, propano y acetileno.

Los científicos creen que estas emanaciones proceden de un océano interior, similar al postulado en la luna Europa, pero a mucha menos profundidad. Además, se piensa que el hidrógeno molecular detectado es indicativo de la existencia de fuentes hidrotermales que, como en la Tierra, pueden proporcionar condiciones propicias para la vida. Esto convierte a Encélado en uno de los grandes candidatos de nuestro sistema solar para albergar algún tipo de forma de vida, lo que ha llevado a varias agencias espaciales a programar diversas misiones no tripuladas destinadas a explorar el interior del satélite.

Además de Europa, Ganímedes y Encélado (ver imágenes de los tres satélites en página contigua), los científicos han identificado otros potenciales candidatos para albergar océanos interiores. Entre ellos, Calisto, el cuarto satélite galileano del que se cree que contiene agua líquida a unos 100 km de su superficie cubierta de cráteres. Otro candidato es Tritón, el mayor satélite

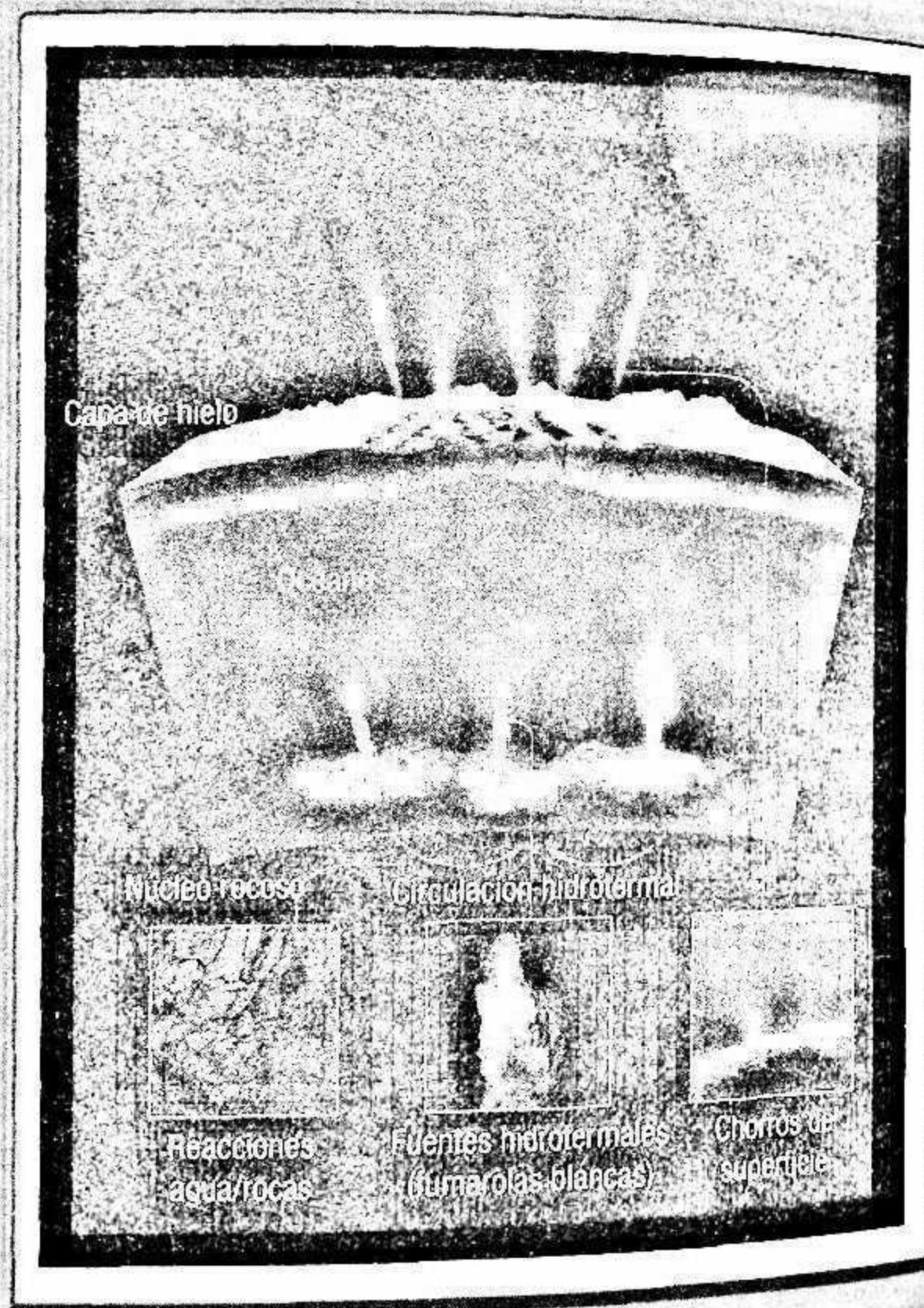


Arriba, a la izquierda, detalle de Europa. A su derecha, Ganímedes, el satélite natural más grande de Júpiter y de todo el sistema solar. Abajo, a la izquierda, la blanca superficie de Encélado, fotografiada por la sonda Cassini, la cual también captó, a su derecha, las plumas de vapor de agua eyectadas por el satélite.

EL OCÉANO INTERIOR DE ENCÉLADO: ¿UN NICHU DE VIDA EXTRATERRESTRE?

Las observaciones realizadas por la sonda Cassini desde 2005 han convertido a Encélado en uno de los objetos más excitantes de nuestro sistema solar. Los espectaculares chorros de vapor de agua expulsados a gran presión nos hablan de la existencia de un gran océano interior. Pero además de agua, Cassini detectó pequeñas cantidades de hidrógeno molecular y otros compuestos, como dióxido de carbono, metano y amoníaco. La presencia de estos compuestos es muy sugerente ya que, en los océanos terrestres, suelen estar asociados a fuentes hidrotermales. En estas, el agua se filtra a través de las rocas porosas del fondo marino para salir expelida a gran temperatura y presión, junto con minerales y gases disueltos en ella. Se sospecha que un fenómeno similar puede estar ocurriendo en el interior de Encélado (en la imagen, recreación del océano de este satélite). En la Tierra, el calor generado y los compuestos expulsados constituyen la fuente de energía para varias formas primitivas de vida que no requie-

ren de la energía solar. Un ejemplo son las llamadas *arqueas metanógenas*, microorganismos anaeróbicos que obtienen energía para subsistir mediante la producción de metano, un proceso conocido como metanogénesis. Uno de estos mecanismos consiste en la combinación de hidrógeno y dióxido de carbono disuelto en el agua. Esta reacción química parece encontrarse en el origen de la vida en la Tierra. Es concebible pensar que estos procesos se puedan dar también en las fumarolas de los océanos interiores de Encélado (o de otras lunas del sistema solar) donde, gracias a los datos recogidos por la sonda Cassini, sabemos que existen los ingredientes necesarios para que esto ocurra.



de Neptuno, el cual posee una tenue atmósfera de nitrógeno alimentada por géiseres, además de la superficie más fría de todo el sistema solar (unos 35-40 grados por encima del cero absoluto). Incluso el lejano Plutón, degradado a planeta enano, podría contener agua líquida en su interior.

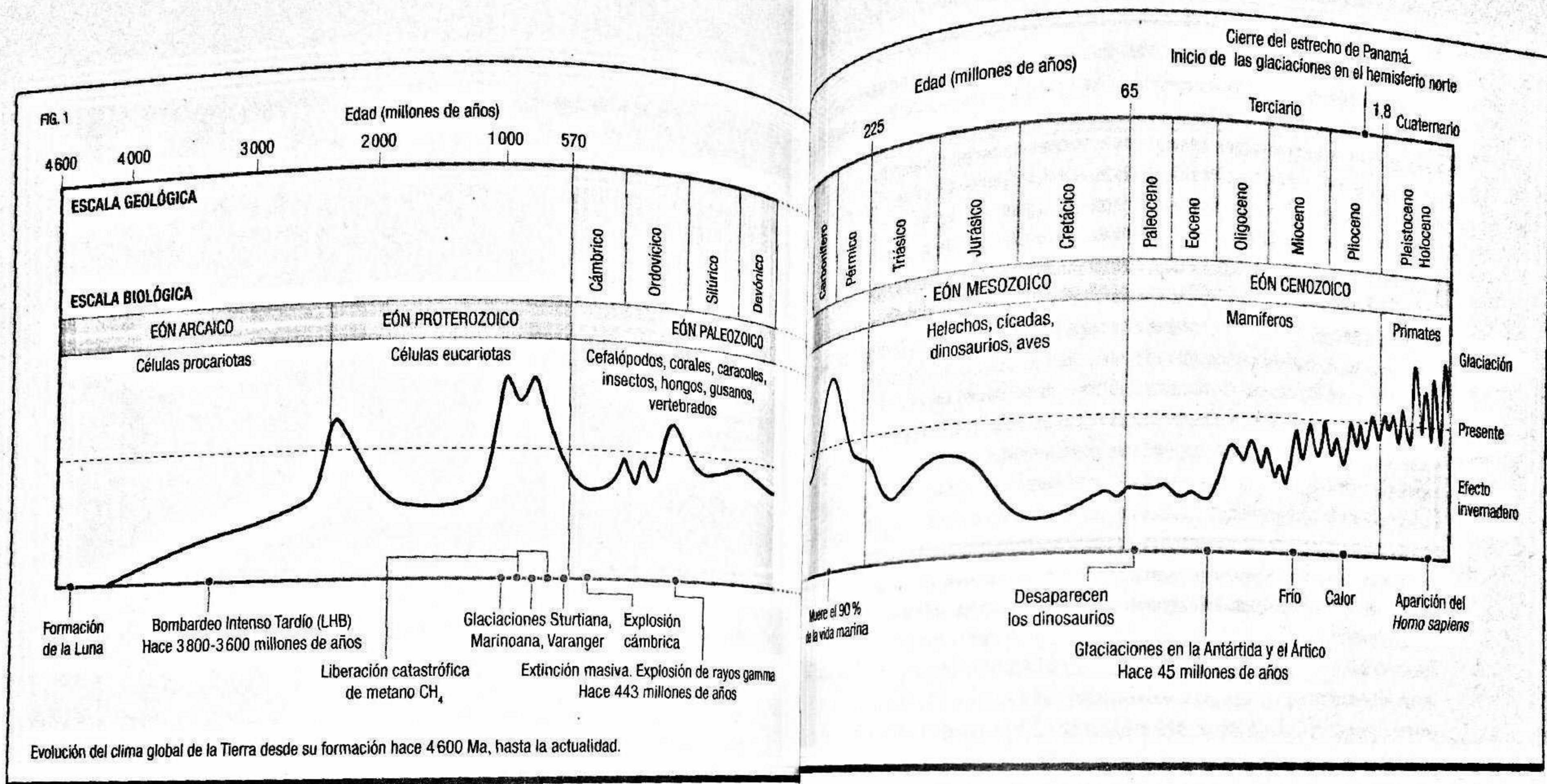
En apenas medio siglo, hemos pasado de pensar en las lunas como objetos rocosos e inertes, a considerarlos objetos de primera categoría, tan interesantes o más que los planetas en torno a los que orbitan. La gran pregunta que los científicos ansían responder es, ¿será en ellos donde encontraremos la primera muestra de vida extraterrestre?

El clima del pasado y del futuro

El clima de los planetas de nuestro sistema solar no siempre fue como lo conocemos ahora. En el pasado, Venus y Marte disfrutaron de climas más parecidos al terrestre, pero evolucionaron hasta convertirse en los inhóspitos cuerpos celestes actuales. ¿Le espera al clima de la Tierra un futuro igualmente hostil?

Los planetas y las lunas de nuestro sistema solar se acabaron de formar hace unos 4 600 Ma (millones de años), un largo periodo de tiempo durante el cual han sufrido grandes cambios tanto en su morfología como en su clima, hasta adquirir su aspecto actual. Desde luego, es probable que estos cambios sigan ocurriendo en la actualidad, aunque a un ritmo tan lento que solo sean perceptibles a escalas de miles o incluso millones de años.

En el caso de la Tierra, que obviamente es el que mejor conocemos, los registros geológicos nos hablan de los continuos cambios climáticos ocurridos a lo largo de la historia (figura 1). Inicialmente, el planeta en el que habitamos debió ser un objeto muy caliente, compuesto por roca fundida, que poco a poco fue enfriándose hasta desarrollar una corteza sólida. Este calor provenía de la propia contracción gravitatoria, así como de las continuas colisiones con objetos errantes. El último gran cataclismo de este tipo, ocurrido hace 4 500 Ma, consistió en la colisión con un objeto del tamaño de Marte, a partir de cuyos restos surgió la Luna. Durante los siguientes 500-600 Ma, los choques con otros objetos más pequeños debieron ser constantes. A pesar de lo agitado de este periodo, hay algunas evidencias fósiles



les que apuntan a la existencia de organismos vivos hace nada menos que 3400 Ma. La existencia de agua líquida en los primeros océanos terrestres, que podrían datar de hace 3800 Ma, pudo proporcionar las condiciones propicias para ello. Desde entonces, la Tierra ha pasado por periodos cálidos y fríos pero, salvo raras excepciones, manteniéndose siempre en una franja de temperaturas relativamente estrecha, por encima del punto de congelación y bastante por debajo del de ebullición del agua. Una de estas excepciones fue la gran glaciación ocurrida hace unos 700 Ma, durante la cual la totalidad de los continentes y océanos de la Tierra quedaron cubiertos por una gruesa capa

de hielo donde se alcanzaron temperaturas medias de -50°C , convirtiendo al planeta en una gran bola de nieve.

En los últimos 4-5 millones de años ha existido, según las pruebas geológicas, una propensión al enfriamiento del planeta acompañada de una disminución general de las precipitaciones. Esta tendencia general se ha visto alterada por repetidas fluctuaciones, algunas de las cuales ocurren con una curiosa periodicidad. Por ejemplo, durante el último millón de años, se han observado glaciaciones con intervalos regulares de unos 100 000 años. La comprensión de estos cambios periódicos, conocidos como *ciclos climáticos*, es una de las grandes cuestiones a las que intenta dar respuesta

la paleoclimatología. Otra cuestión, igualmente intrigante, tiene que ver con el hecho de que el brillo solar ha ido aumentando paulatinamente, siendo actualmente un 30% mayor que hace 4600 Ma. Esto llevaría a pensar que la temperatura de la Tierra debería haber ido también en aumento pero, como acabamos de mencionar, en realidad ha ido fluctuando entre periodos fríos y cálidos, manteniéndose dentro de una franja apta para la persistencia de la vida.

¿Qué hay de nuestros vecinos más próximos, Venus y Marte? Es lógico pensar que también ellos han experimentado cambios climáticos globales a lo largo de su historia. Sin embargo, estos cambios han debido seguir una tendencia diferente a los terrestres ya que, habiéndose formado en condiciones similares a las de nuestro planeta, presentan actualmente climas muy diferentes al nuestro. Venus se ha convertido en un horno con temperaturas de más de 400 °C en su superficie y con una gruesa atmósfera corrosiva rica en CO₂. Marte, por contra, es actualmente un planeta frígido y seco, con una tenue atmósfera, también de CO₂. En medio, se sitúa nuestro planeta, con su atmósfera rica en nitrógeno y oxígeno (ambos gases minoritarios en las atmósferas de sus vecinos), y una temperatura benigna que permite la existencia de agua en sus tres fases. Este hecho ha sido sin duda fundamental para la existencia de vida, al menos, tal y como la conocemos. Esto nos lleva a otras preguntas. ¿Ha sido igual de estable el clima de los otros planetas del sistema solar o, por el contrario, han pasado por climas más favorables que el que presentan en la actualidad?

Como ya hemos mencionado, la atmósfera determina en buena medida el clima de un planeta o luna por lo que, para dar respuesta a las cuestiones anteriores, comenzaremos abordando el tema del origen y evolución de las atmósferas en esos planetas interiores.

TIERRA, MARTE, MERCURIO Y VENUS: ATMÓSFERAS DE ORIGEN TARDÍO

Ya se ha comentado que, según el modelo más aceptado por la comunidad científica, los planetas del sistema solar se formaron a partir de la llamada nebulosa solar. Esa nube de gas y polvo

colapsó gravitatoriamente en un momento dado, dando lugar a un protosol, alrededor del cual se formaron objetos pequeños, los planetésimos, que fueron agrupándose a su vez en objetos cada vez mayores hasta conformar los actuales planetas. Aunque la nebulosa primigenia contenía en torno a un 98% de hidrógeno y helio, el campo gravitatorio de los planetas interiores fue probablemente insuficiente para atrapar cantidades significativas de estos gases. Además, en el relativamente cálido entorno solar, la agitación térmica de las moléculas de las atmósferas primigenias, unido al bombardeo de partículas provenientes del Sol, fue suficiente para despojar a los planetas internos de estas atmósferas ancestrales. Las atmósferas actuales de estos planetas tienen, por tanto, un origen posterior a la formación de los propios planetas.

Aceptando, por tanto, el origen tardío de las atmósferas de esos planetas interiores, los científicos han apuntado a dos posibles mecanismos. El primero sería de tipo endógeno, y consistiría en la emanación de gases del interior del planeta, donde se encuentran absorbidos o fijados químicamente. El otro, de tipo exógeno, procedería de los meteoritos que, durante cientos de millones de años, han estado bombardeando a los planetas y a sus lunas. En particular, estos meteoritos contienen abundante agua (aproximadamente una quinta parte de su masa) con lo que es posible que el impacto constante por parte de estos objetos haya aportado ingentes cantidades de agua a los planetas.

En el caso de la Tierra, parece ser que el mecanismo dominante ha sido el endógeno. De hecho, es un proceso que sigue ocurriendo hoy en día, principalmente a través de la actividad tectónica y de las erupciones volcánicas, las cuales expulsan abundantes cantidades de vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) y monóxido de carbono (CO) (ver imagen superior de la página 139). Cuando la temperatura de la Tierra descendió lo suficiente, hace unos 3800 Ma, el vapor de agua acumulado en la atmósfera comenzó a condensarse y caer en forma de lluvia, dando lugar a los océanos. Este proceso pudo extenderse durante millones de años, terminando por cubrir la mayor parte del planeta. Otros gases, como el nitrógeno, el dióxido de azufre (SO₂), el ácido clorhídrico (HCl), o el ácido fluorhídrico (HF),

también emanaron de las entrañas de la Tierra. Cada uno siguió un curso diferente, según su naturaleza. El SO_2 , el HCl y el HF

La vida no es un milagro. Es un fenómeno natural y puede esperarse que aparezca, siempre que haya un planeta que duplique las condiciones de la Tierra.

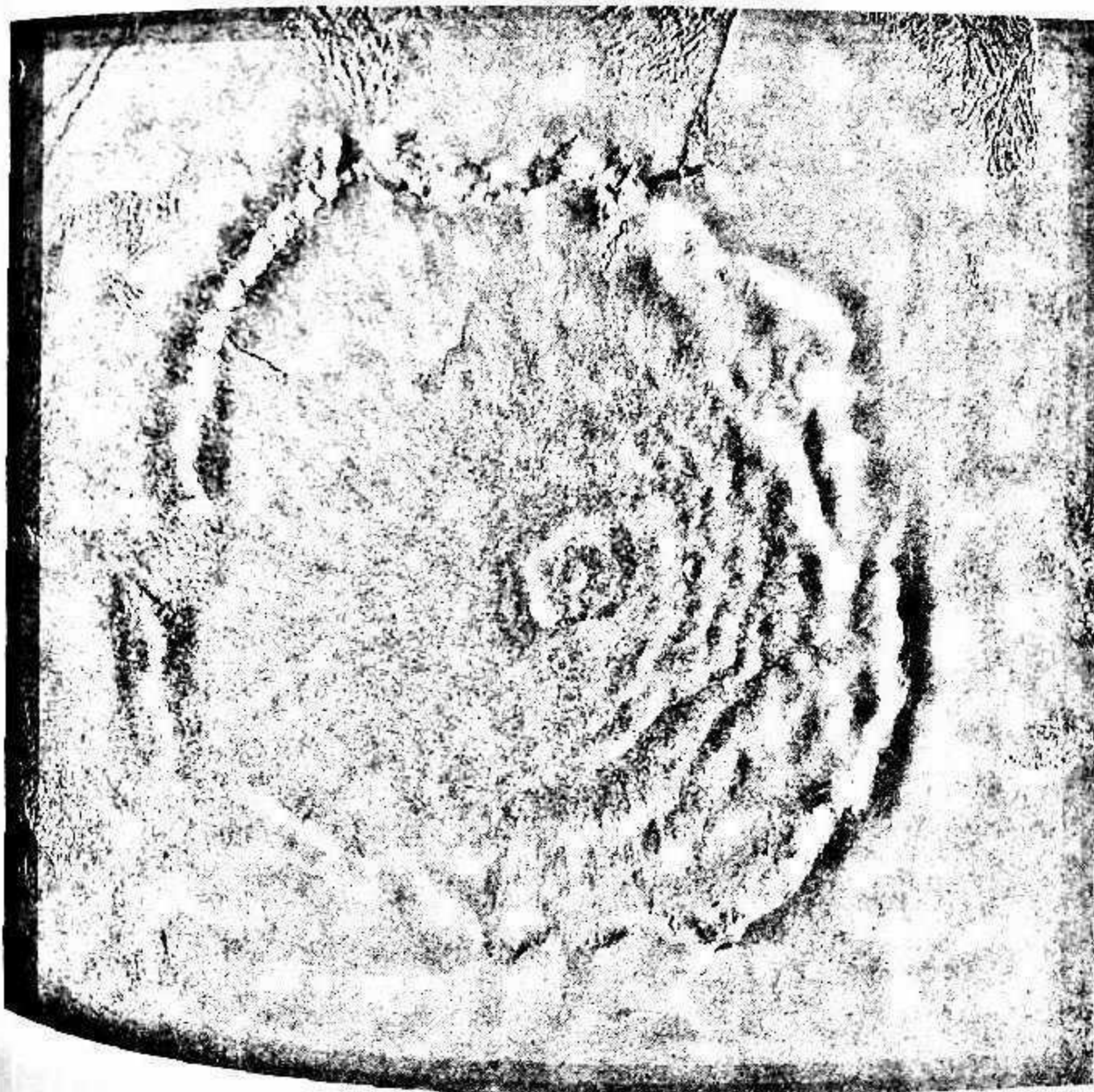
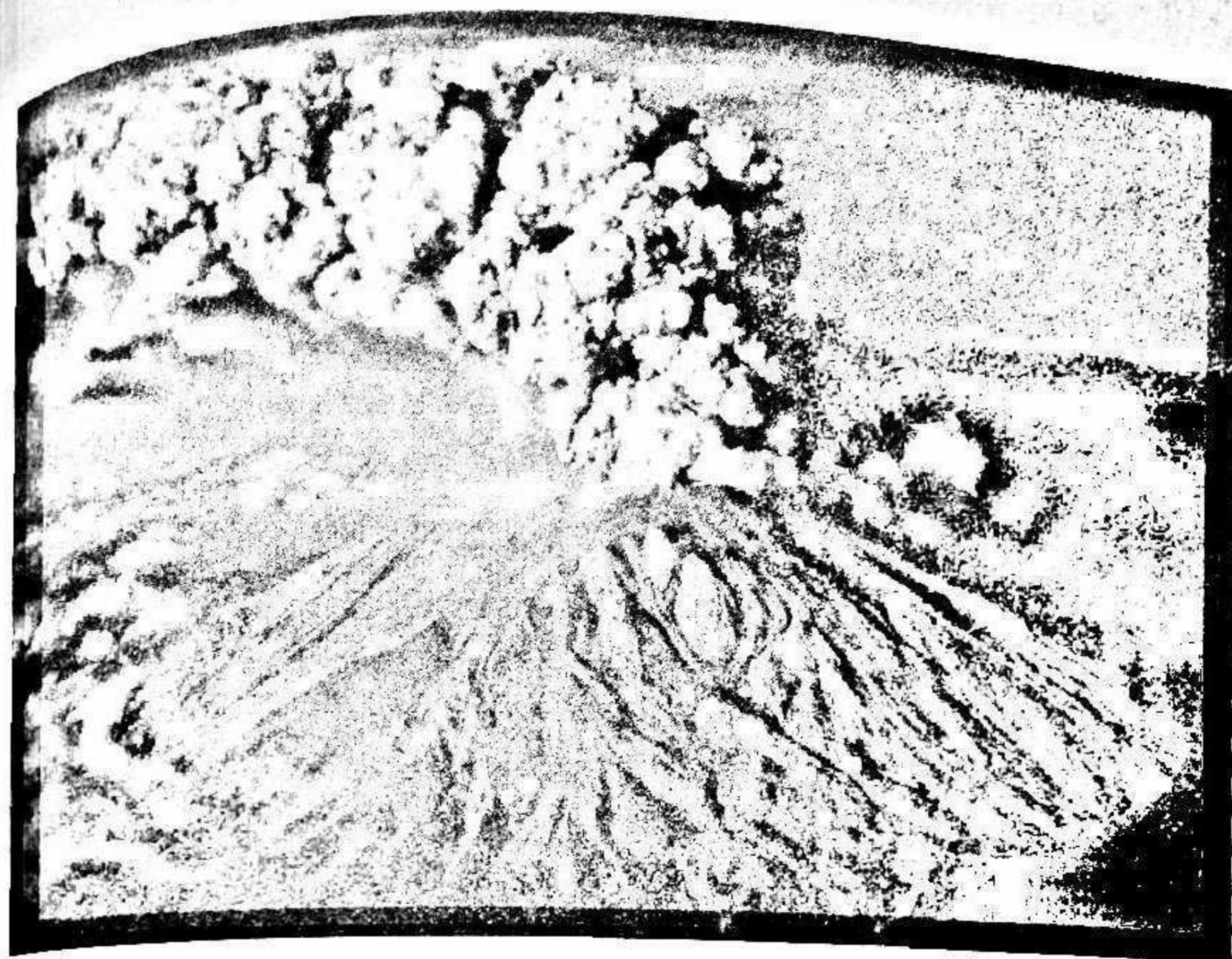
HAROLD UREY

se diluyeron en las masas oceánicas, dando lugar a las sales marinas y otros minerales. En el caso del nitrógeno, al no disolverse en agua, se acumuló mayoritariamente en la atmósfera, hasta el punto de convertirse en su principal componente. Los otros dos componentes principales de esta atmósfera primitiva fueron el CO_2 y el

metano (CH_4). El oxígeno (O_2), el segundo componente de nuestra atmósfera actual, apareció mucho más tarde, como veremos.

La existencia de océanos desde hace al menos 3800 Ma plantea un serio problema. Según los modelos de evolución estelar, en esta época el brillo solar era un 25% menor que el actual. Suponiendo que la atmósfera de entonces era igual a la de ahora, los modelos matemáticos nos dicen que, en tales condiciones, la Tierra debía estar de forma permanente a temperaturas bajo cero y el agua de su superficie estaría, por tanto, congelada. Sin embargo, hay evidencias (por ejemplo, a partir de la datación de rocas sedimentarias) que prueban que en esa época existía agua en estado líquido. Una aparente contradicción, que se conoce como la «paradoja del Sol joven y débil», que ha sido objeto de debate desde que fuera apuntada por primera vez por los astrofísicos Carl Sagan y George Mullen en 1972. Una de las explicaciones más aceptadas supone que, en el pasado, la atmósfera de la Tierra contenía mayores cantidades de gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono o el metano. En la actualidad el CO_2 supone apenas un 0,03-0,04% de la atmósfera terrestre y el metano aparece en trazas, pero podrían haber existido en cantidades mucho mayores en el pasado.

En el caso de Marte, no hay evidencia de actividad tectónica, pero sus numerosos cráteres sugieren una intensa actividad volcánica en el pasado que podría haber jugado un papel similar al de los volcanes terrestres, expulsando, entre otros gases, grandes cantidades de vapor de agua y dióxido de carbono. Un ejemplo es el monte Olimpo que, con sus 22-23 km de altura sobre la llanu-



Arriba, una imagen de la erupción del monte Santa Helena, en Estados Unidos, ocurrida en 1980. Las erupciones volcánicas expulsan grandes cantidades de dióxido de carbono y vapor de agua al exterior. Abajo, imagen del monte Olimpo de Marte, el mayor volcán conocido del sistema solar, fotografiado por la sonda Viking 1.

ra circundante, es el mayor volcán del sistema solar (ver imagen inferior de la página 139). Ya vimos que las misiones espaciales a Marte han encontrado numerosas evidencias de la existencia de abundante agua en forma líquida en el pasado marciano: rocas sedimentarias, cantos rodados, cauces fluviales... Nuevamente, la explicación más plausible es que Marte tuvo una densa atmósfera de CO_2 , capaz de generar el efecto invernadero necesario para elevar la temperatura del planeta y permitir la existencia de agua líquida.

En cuanto a Venus, el menor brillo solar en los albores de nuestro grupo planetario jugó a su favor en estas etapas tempranas, ya que debió impedir el efecto invernadero descontrolado que domina hoy en día el abrasador clima del planeta. Además, durante esta etapa inicial, Venus estaría en la zona habitable, es decir, en el rango de distancias al Sol donde puede existir agua en forma líquida. Gracias a ello, se considera muy probable que durante más de 2000 Ma el planeta albergara océanos de agua líquida y condiciones aptas para la vida.

Así pues, poco después de la formación del sistema solar, la Tierra y sus dos vecinos más cercanos, Venus y Marte, habrían evolucionado de forma muy parecida. Tras dejar escapar los gases más ligeros (hidrógeno, helio), la desgasificación de su interior les proporcionó atmósferas ricas en dióxido de carbono y abundante agua líquida en forma de océanos. En esta fase, los tres planetas partían de condiciones propicias para la vida pero, aparentemente, esta solo se ha dado en la Tierra. Venus evolucionó hacia el planeta tórrido que es hoy, mientras que Marte se convirtió en el planeta árido y frío que conocemos.

LA PARADOJA DEL SOL JOVEN Y DÉBIL Y LA HABITABILIDAD TERRESTRE

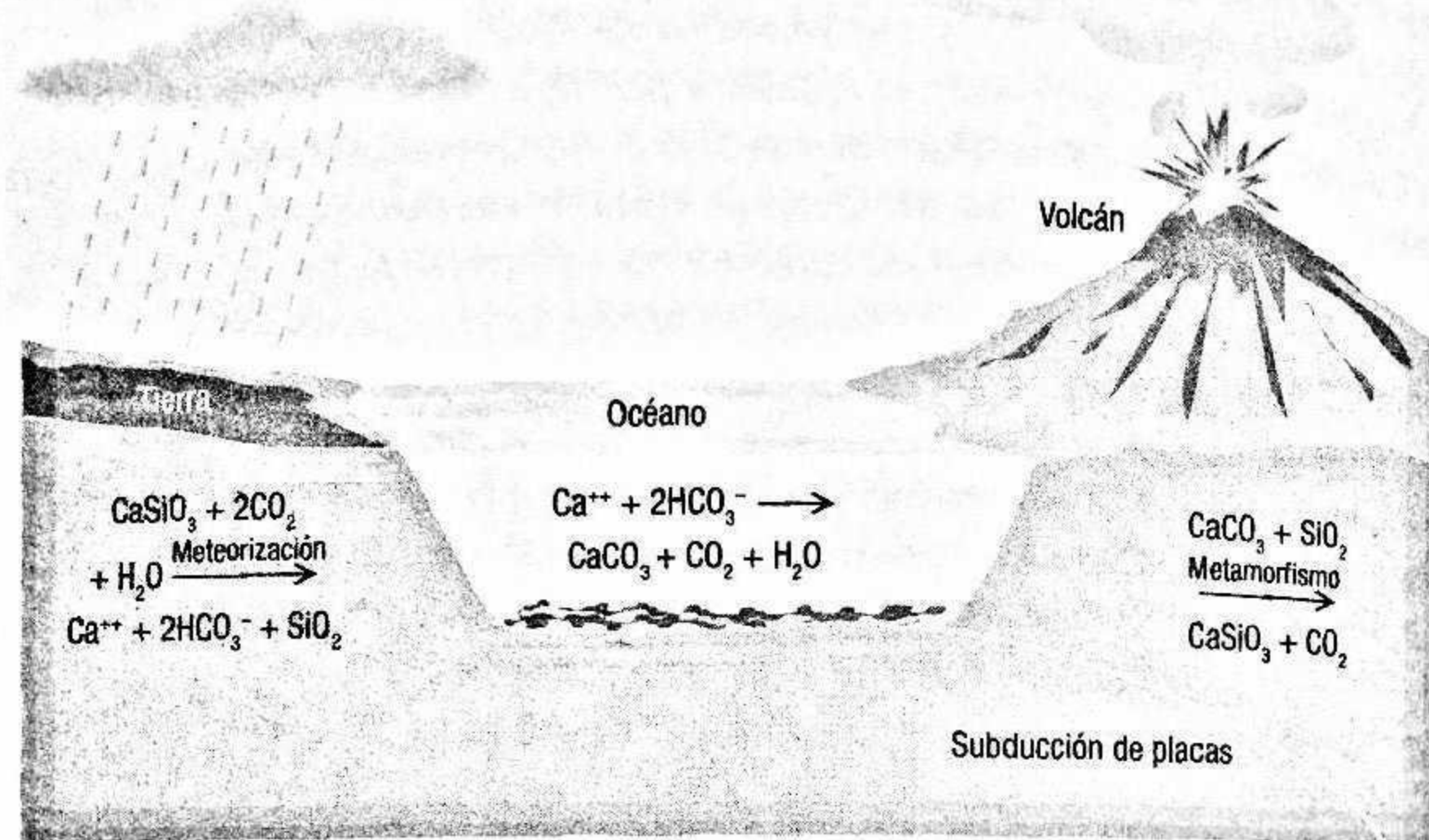
Se ha comentado que una posible explicación a la paradoja del Sol joven y débil es que, en el pasado, la atmósfera terrestre contuviera mayores cantidades de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono y metano. Pero esta interpretación resuelve solo parcialmente el problema ya que, de haber sido así, el aumento pos-

terior de la luminosidad solar habría producido el calentamiento progresivo del planeta, elevando su temperatura hasta valores letales para la vida terrestre. A esto se sumaría que, debido al proceso de desgasificación del interior, la cantidad de CO_2 en la atmósfera no dejaría de crecer, intensificando aún más el efecto invernadero. Sin embargo, como sabemos, a lo largo de varios miles de millones de años, el clima terrestre se ha mantenido dentro del rango de habitabilidad. ¿Qué mecanismo lo ha hecho posible y por qué no ha ocurrido lo mismo en otros planetas, como Venus o Marte?

La respuesta fue propuesta por el eminente físico-químico y premio Nobel de Química estadounidense Harold Urey en 1952. La idea es que hay procesos que eliminan continuamente CO_2 de la atmósfera. Por un lado, este se disuelve en las aguas de mares y océanos (de hecho es el mismo gas responsable de las burbujas de las bebidas carbonatadas). Por otro lado, cuando el CO_2 se disuelve en agua de lluvia se convierte en ácido carbónico. Este reacciona con las rocas, disolviéndolas y liberando, entre otros productos, bicarbonato (HCO_3^-), el cual es arrastrado por el agua hasta los mares y océanos, donde se va depositando en forma de sedimento. A ello contribuyen de manera decisiva los trillones de pequeños organismos marinos que transforman el HCO_3^- en caliza para construir sus resistentes conchas o caparazones, y que terminan precipitando al fondo marino cuando mueren. Se trata de un proceso lento pero que, al cabo de miles de millones de años, puede producir sedimentos de cientos de metros de profundidad, como los espectaculares acantilados de Dover, en la costa inglesa (ver imagen superior en la página 147).

Estos procesos reducen drásticamente la cantidad de CO_2 en la atmósfera y, con ello, también el efecto invernadero, bajando la temperatura del planeta. La disolución del CO_2 en agua se hace más eficiente cuanto mayor es la temperatura, con lo que el aumento de la luminosidad solar fue compensado por una mayor destrucción de CO_2 en la atmósfera, lo que redujo el efecto invernadero. El CO_2 sedimentado puede volver al exterior mediante los fenómenos de volcanismo (figura 2). Este intercambio cíclico de CO_2 entre la corteza y la atmósfera desempeña además un papel clave como regulador de la temperatura del planeta.

FIG. 2



El dióxido de carbono atmosférico, junto al agua de lluvia, disuelve las rocas de la corteza, produciendo bicarbonato. Este es arrastrado a los océanos, donde reacciona con otros minerales y se deposita en su fondo marino. Debido a los movimientos de subducción es conducido a profundidades mayores, donde la elevada temperatura termina liberando de nuevo el CO₂, que es expulsado en las erupciones volcánicas.

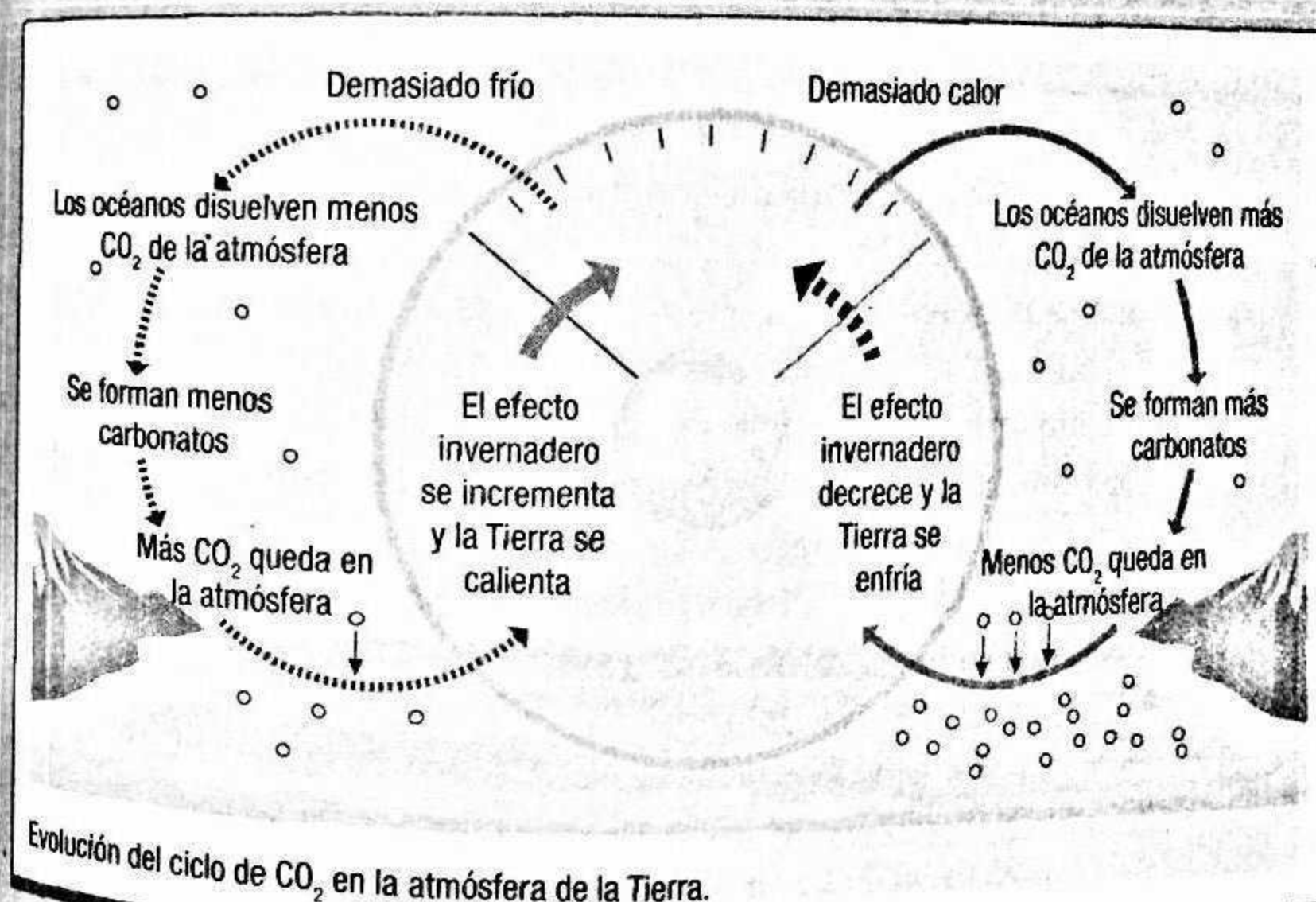
¿Por qué no funcionó un mecanismo similar en el caso de Venus y Marte? Las reacciones que forman los carbonatos tienen lugar únicamente en presencia de agua líquida. Si la temperatura del planeta se hace tan elevada que se evapora toda el agua, este mecanismo queda por tanto inhibido y el CO₂ tenderá a acumularse en la atmósfera, aumentando la temperatura del planeta por efecto invernadero. Además, el vapor de agua actúa también como gas de efecto invernadero, con lo que su presencia en la atmósfera contribuiría a «atrapar» más calor, aumentando aún más la temperatura del planeta, y propiciando una mayor evaporación. Aparentemente, esto es lo que le ocurrió a Venus. Tras la formación de los planetas, hace 4600 Ma, Venus se encontraba en la zona de habitabilidad, conteniendo agua en estado líquido e incluso océanos. Al aumentar el brillo solar, esta se alejó más allá de la órbita de Venus, desencadenando el efecto invernadero

EL CICLO GEOLÓGICO DEL CO₂ TERRESTRE Y SU EFECTO TERMOSTATO

El dióxido de carbono (CO₂) desempeña un importante papel como regulador de la temperatura del planeta y de su biosfera. El CO₂ se elimina de la atmósfera al disolverse en el agua de lluvia y al reaccionar con las rocas (principalmente silicatos) de la corteza. De este modo, es transportado a los océanos, donde reacciona con los minerales disueltos en el agua, formando carbonatos, como la caliza. Estos se van depositando en forma de sedimentos en los fondos marinos. Debido a los movimientos de subducción producidos por la tectónica de placas, estos sedimentos son transportados a zonas más profundas, donde son sometidos a elevadas temperaturas y presiones, que les hacen desprenderse nuevamente del CO₂, que retorna a la atmósfera a través de erupciones volcánicas.

Un ciclo súper lento: medio millón de años

Se trata de un ciclo muy lento (aproximadamente medio millón de años para un átomo de carbono típico) (ver figura). El CO₂ presente actualmente en la atmósfera representa, por tanto, un equilibrio entre estos dos procesos. La formación de carbonatos se hace más eficiente cuanto mayor es la temperatura. Si el planeta se calienta, se pierde más CO₂ de la atmósfera, y la temperatura baja. Por contra, si el planeta se enfría, se disuelve menos CO₂ en los océanos, acumulándose en la atmósfera y aumentando su temperatura. De este modo, el CO₂ actúa como una especie de termostato, regulando la temperatura terrestre. Gracias a este mecanismo, la temperatura de la Tierra se pudo mantener muy por debajo del punto de ebullición del agua, permitiendo la existencia de océanos en forma líquida, a pesar del aumento del brillo solar.



Evolución del ciclo de CO₂ en la atmósfera de la Tierra.

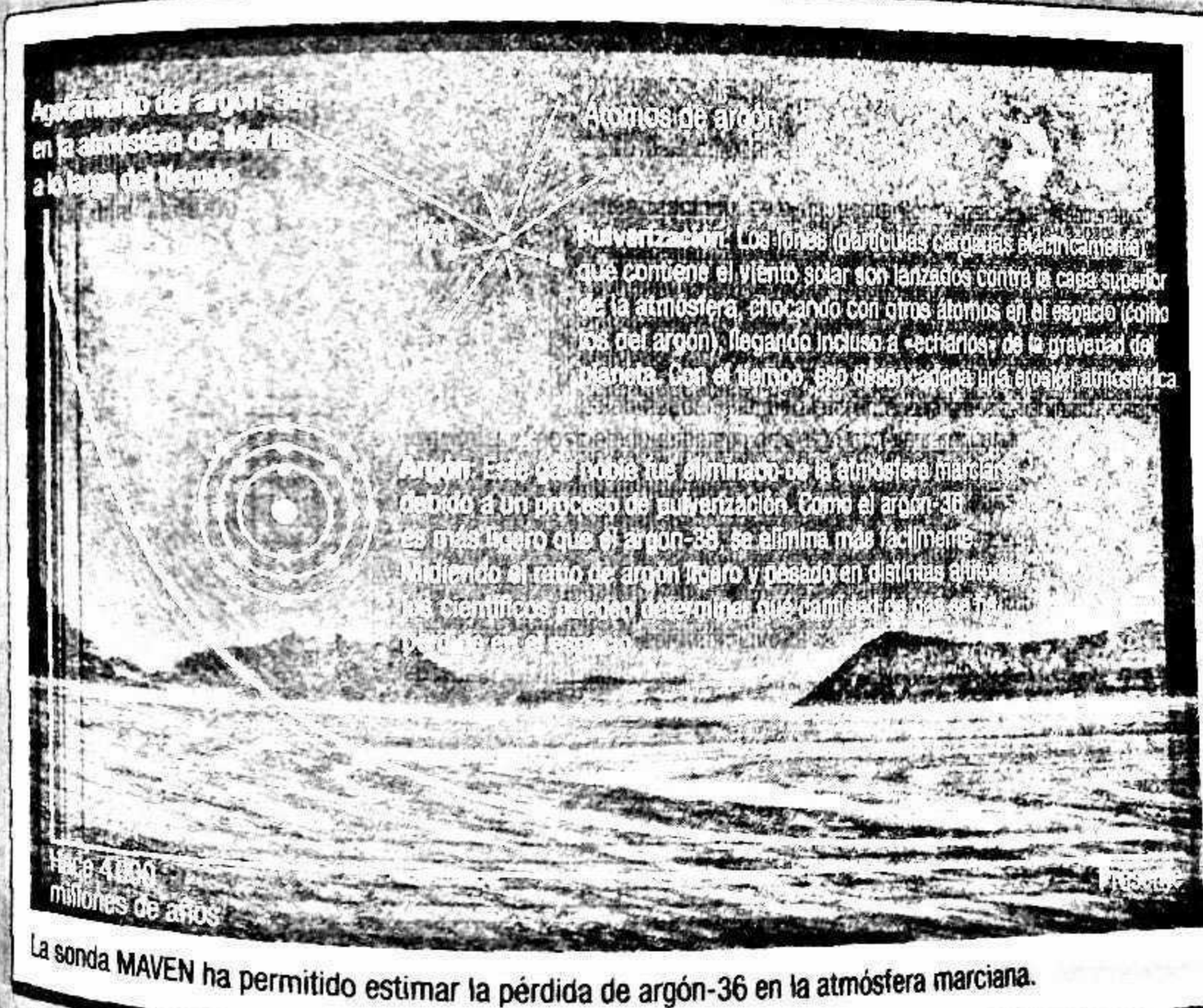
descontrolado. Esto trajo aparejada la desaparición de sus océanos y, posteriormente, la disociación de las moléculas de vapor de agua de la atmósfera debido a la radiación solar, tras lo cual el hidrógeno escapó al espacio exterior.

En el caso de Marte, su destino fue otro bien distinto. Por un lado, su mayor lejanía del Sol lo mantendría a salvo del efecto invernadero descontrolado. La desgasificación de su interior proporcionó al planeta una envoltura gaseosa rica en CO_2 , similar o incluso más densa que la que posee actualmente la Tierra. El consiguiente efecto invernadero permitiría mantener una temperatura lo suficientemente cálida como para permitir la existencia de agua líquida en su superficie, como así parecen confirmar los registros geológicos. Sin embargo, el planeta comenzó a perder su atmósfera, lo que se tradujo en un profundo cambio climático, convirtiendo un planeta húmedo y cálido en otro seco y frío. Marte posee hoy en día una atmósfera muy tenue, con unas 100 veces menos de gas que la terrestre. Con el objetivo de esclarecer los mecanismos responsables de la pérdida gradual de la atmósfera marciana, en 2014 la NASA envió a Marte la sonda MAVEN (*Mars Atmosphere and Volatile Evolution*). Gracias a los datos recogidos, se ha podido determinar que los principales causantes de la desaparición de la atmósfera han sido el viento y la radiación solar. La eliminación de CO_2 por este mecanismo redujo el efecto invernadero y llevó al enfriamiento del planeta.

Viendo el dramático destino que han sufrido Venus y Marte, es inevitable preguntarnos cómo de cerca estuvo la Tierra de sucumbir a uno u otro escenario. Ciertamente, nuestra ubicación en la privilegiada zona de habitabilidad del sistema solar ha tenido mucho que ver en el clima templado de nuestro planeta. Según diversas estimaciones, si colocáramos al planeta Tierra en la órbita de Venus, terminaría sometándose también al efecto invernadero descontrolado. Por otro lado, el hecho de que nuestra atmósfera no haya sido barrida por el viento solar, como la marciana, es gracias al potente campo magnético terrestre, que hace que la mayor parte de las partículas del viento solar sean desviadas sin llegar a colisionar con los iones de la atmósfera.

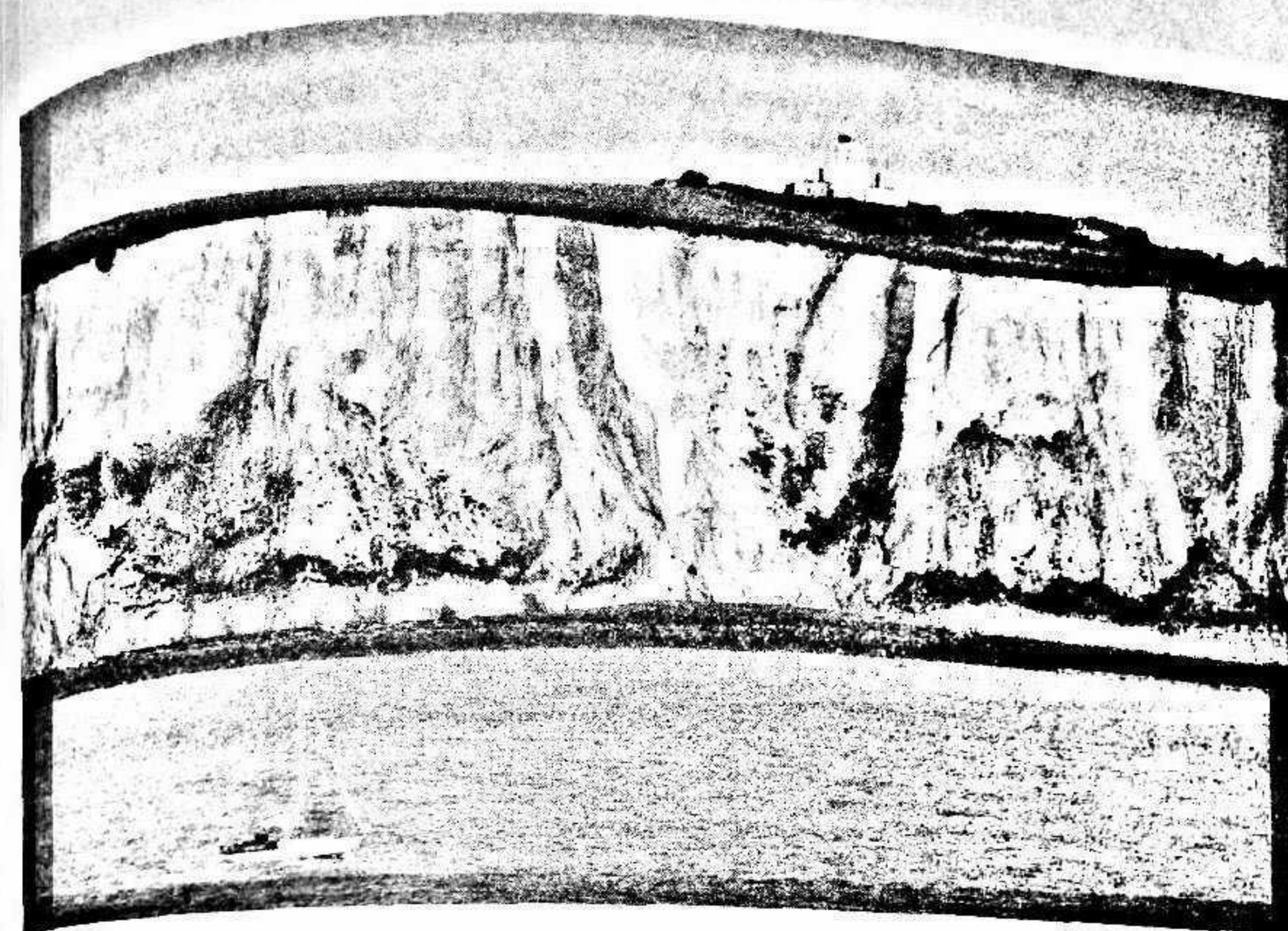
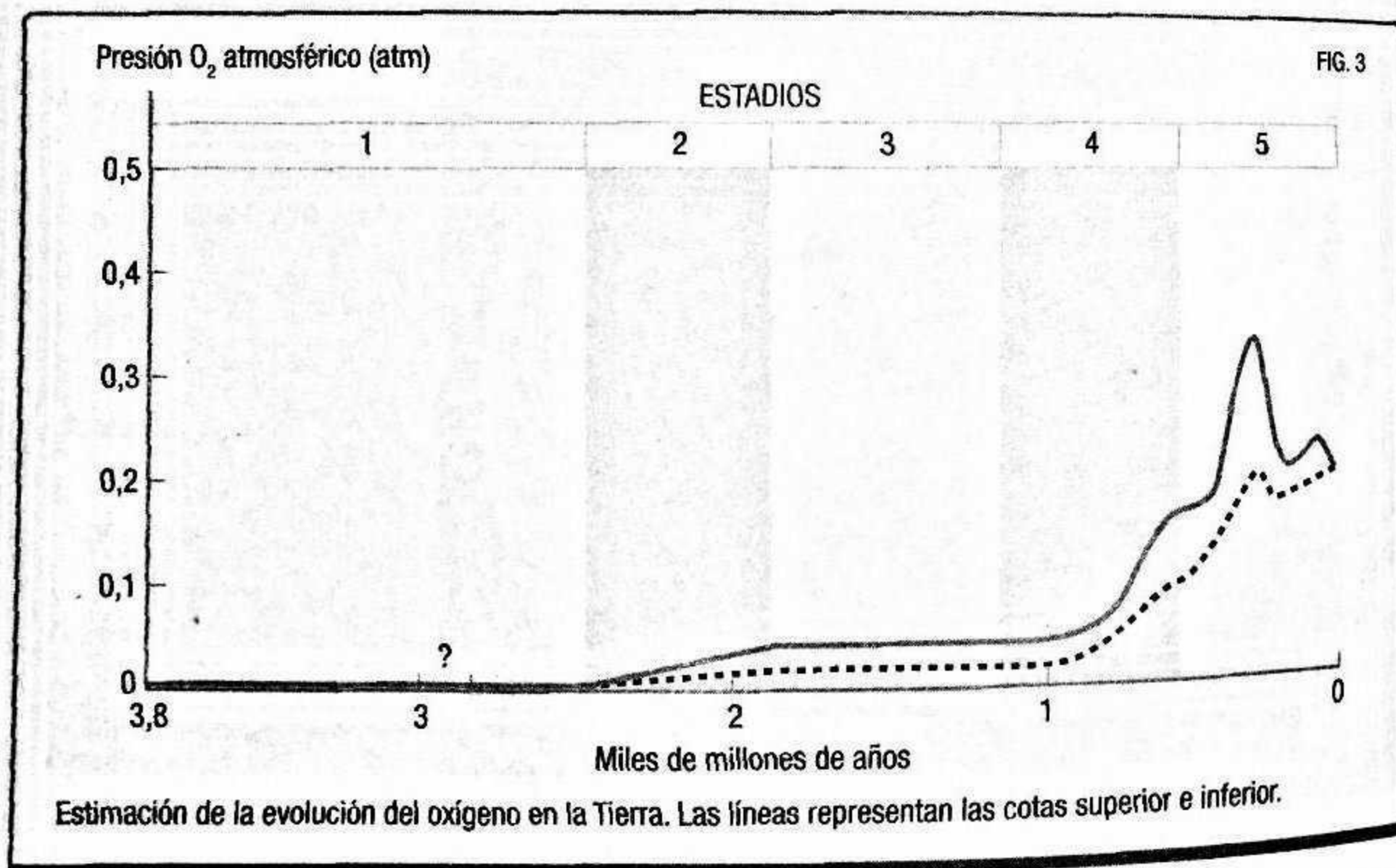
¿POR QUÉ PERDIÓ MARTE SU ATMÓSFERA?

Hace unos 4000 Ma, el planeta Marte poseía una densa y gruesa atmósfera rica en dióxido de carbono. Esta le proporcionó el efecto invernadero necesario para hacer del joven planeta un lugar cálido y permitir la existencia de agua líquida en su superficie. Sin embargo, esta atmósfera se fue perdiendo poco a poco, produciendo un enfriamiento gradual del planeta y la desaparición del agua líquida en su superficie. De acuerdo con las medidas de la sonda MAVEN, en órbita en torno a Marte desde 2014, la causa de este proceso estaría en la acción del viento y la radiación solar sobre las partículas de la atmósfera. En la parte alta de la atmósfera de Marte, como en la de la Tierra, las moléculas son despojadas de sus electrones por la intensa radiación solar (principalmente los rayos X y ultravioletas), en un proceso conocido como ionización. Debido al déficit de electrones, los átomos y moléculas resultantes quedan cargados eléctricamente (iones). El viento solar, que también está compuesto por partículas cargadas (principalmente electrones y protones), interacciona eléctrica y magnéticamente con estos iones, acelerándolos a gran velocidad. En su camino, colisionan con otros átomos presentes en la atmósfera, los cuales pueden escapar al espacio exterior si adquieren la energía suficiente. Para determinar la cantidad de atmósfera que se ha perdido desde su formación, MAVEN ha medido la concentración de dos isótopos diferentes del gas argón, el 36 y el 38.



EL OXÍGENO TERRESTRE Y EL ORIGEN DE LA VIDA

Hoy en día, el oxígeno constituye el 21% de la atmósfera terrestre, siendo el segundo gas más abundante, después del nitrógeno. Sin embargo, en la atmósfera original este elemento estaba prácticamente ausente. La situación permaneció así hasta hace unos 2450 Ma, momento en el que los registros geológicos muestran la presencia de pequeñas cantidades de oxígeno. El origen de este aumento no es geológico, sino biológico, y se debe a la aparición de formas de vida muy simples, llamadas cianobacterias (imagen inferior de la página contigua), que comenzaron a usar la luz solar para extraer energía mediante la disociación de moléculas de agua, liberando el oxígeno como mero deshecho de este proceso. El proceso, conocido como *fotosíntesis oxigénica*, fue dotando paulatinamente a la atmósfera de oxígeno que, junto con la disminución de CO_2 , terminó conformando su composición actual. La acumulación de oxígeno en la atmósfera no fue un proceso uniforme (figura 3). Durante millones de años, el oxígeno liberado no se acumuló en la atmósfera, sino que se



Arriba, los acantilados de Dover, ubicados en la costa británica frente a Francia, constituidos por una espectacular pared caliza. Abajo, una microfotografía de cianobacterias filamentosas, responsables de la aparición de O_2 en la Tierra.

empleó en la oxidación del hierro para dar óxidos férricos. Hace unos 1800 Ma, empezó a emerger de los océanos formando, por ejemplo, la capa de ozono. Así, 850 Ma atrás, la concentración de oxígeno en la atmósfera comenzó a dispararse hasta alcanzar (y superar en ocasiones) los valores actuales.

Las cianobacterias no fueron los primeros organismos vivos sobre la Tierra. Hay evidencias de que, hace unos 3500 millones de años, existieron bacterias que realizaban otro tipo de fotosíntesis, que convertía la luz infrarroja solar en compuestos de azufre, sin producción de oxígeno. Algunos estudios identifican determinados sedimentos de hace 3700 millones de años con signos de actividad biológica. Teniendo en cuenta que las rocas más antiguas identificadas en la Tierra tienen una edad de unos 3800 millones de años, esto significaría que la vida surgió muy pronto, apenas unos millones de años después del enfriamiento de la Tierra. Este pequeñísimo intervalo de tiempo entre la formación del planeta y la aparición de los primeros indicios de vida ha hecho sugerir a algunos científicos que las primeras semillas para la vida llegaron desde el espacio exterior, quizá a bordo de meteoritos. De hecho, se ha encontrado abundante y variado material orgánico en los restos de meteoritos caídos en la Tierra que otorgan plausibilidad a esta hipótesis.

En cualquier caso, la presencia de las cianobacterias y otros organismos simples durante millones de años vuelve a poner de manifiesto la importancia de las condiciones excepcionales de la Tierra, manteniéndose en un rango de temperaturas apto para estos organismos. Aunque podemos argumentar que, en otros entornos, como los actuales Venus y Marte, podrían darse otras formas de vida muy diferente a la nuestra, lo cierto es que, hasta donde sabemos, ni uno ni otro han conseguido desarrollar ninguna forma de vida.

CAMBIOS CLIMÁTICOS PERIÓDICOS

Hasta ahora, hemos considerado la evolución de los climas planetarios en la escala temporal de miles de millones de años que va desde la formación del sistema solar hasta la actualidad. En

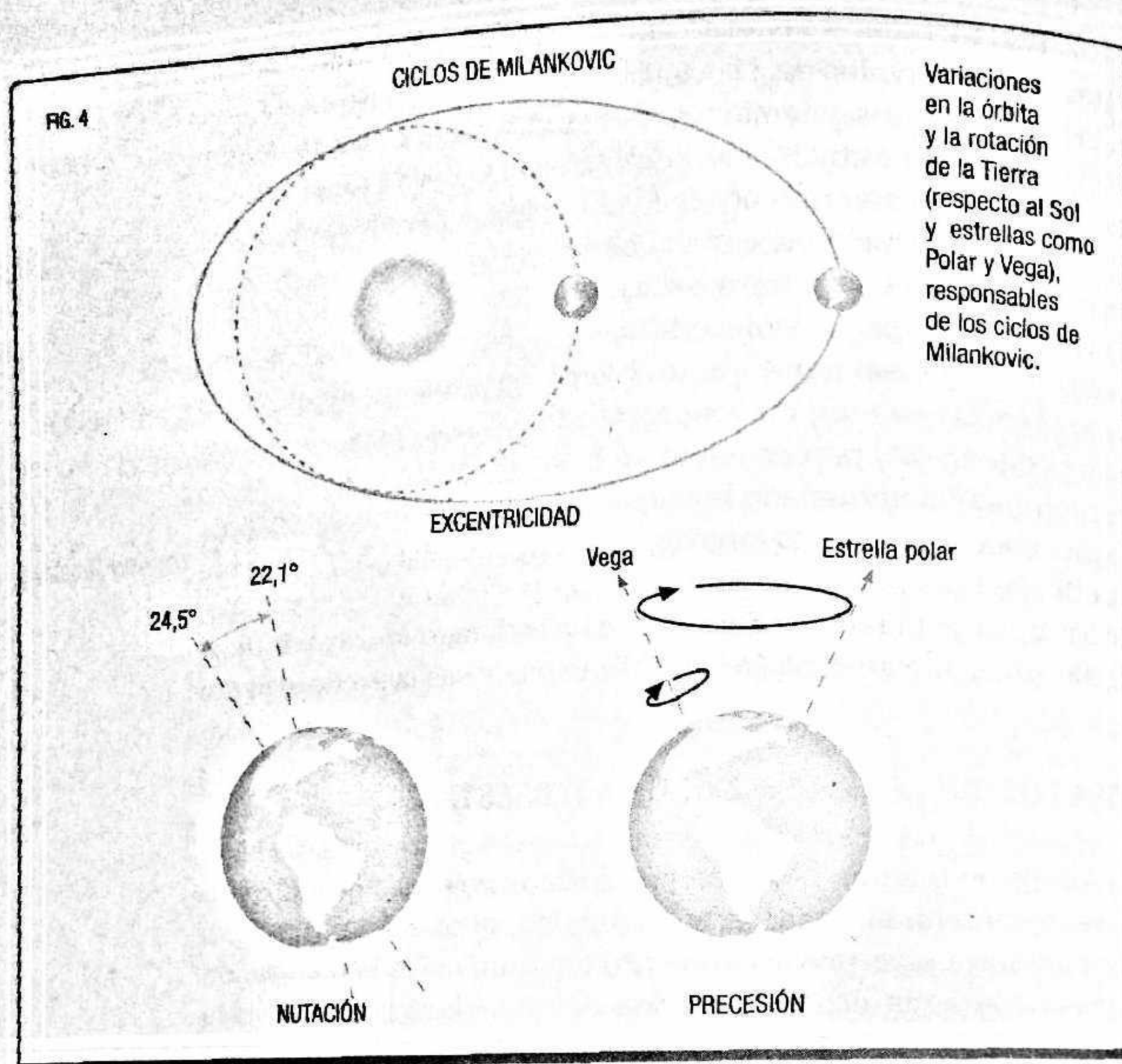
la Tierra, existen evidencias geológicas que muestran cambios climáticos a menor escala, de miles o cientos de miles de años a lo sumo. Este fenómeno fue estudiado por el geofísico e ingeniero serbio Milutin Milankovic (1879-1958), quien atribuyó estos cambios a las variaciones de la órbita y del eje de rotación terrestres. En concreto, identificó tres tipos de alteraciones del movimiento terrestre que producen variaciones periódicas en su clima. El primero es la *variación en la excentricidad de la órbita*, es decir, el grado de achatamiento de la misma, en relación a la forma circular, que hace que la distancia Tierra-Sol vaya variando a lo largo del año. El segundo, la *variación en la oblicuidad* (nutación), es decir, el ángulo que forma el eje de rotación de la Tierra con respecto a la perpendicular del plano de su órbita. Sabemos que actualmente este ángulo es de $23,4^\circ$, pero este valor oscila arriba y abajo $1,5^\circ$ en periodos de 41 000 años. Por último, está el llamado *movimiento de precesión*. Como si de una gran peonza se tratase, el eje de la Tierra va cambiando de orientación, describiendo una circunferencia cada 25 800 años. Mientras que en el caso de una peonza la causa es la gravedad terrestre, en la Tierra es debido a la acción gravitatoria de otros planetas, principalmente la de Júpiter. Estos tres efectos se combinan entre sí, unas veces para reforzarse, y otras para amortiguarse, dando lugar a los llamados *ciclos de Milankovic* (figura 4).

La variación de la oblicuidad, aunque parezca muy pequeña, parece estar detrás de las edades de hielo en la Tierra. Cuando el eje de rotación es más perpendicular al plano orbital (menor oblicuidad), el calentamiento de los polos es menor y el Sol se eleva menos sobre los polos en verano. La temperatura polar es más baja, y se acumula más hielo, produciendo las glaciaciones.

En cuanto a la precesión, esta tiene consecuencias sobre las estaciones terrestres. Las cuatro estaciones del año vienen delimitadas por los equinoccios y solsticios. En los equinoccios, el día y la noche tienen igual duración. Actualmente, estos ocurren

No creo que la humanidad sobreviva otros mil años, a menos que nos diseminemos por el espacio.

STEPHEN HAWKING



el 22 de marzo y el 22 de septiembre. En el solsticio de verano (21 de junio) se da el día más largo del año (la noche más corta), mientras que el de invierno (21 de diciembre) corresponde al día más corto (noche más larga). En la actualidad, el solsticio de verano ocurre en las cercanías del afelio, el punto en el que la Tierra está más alejada del Sol, mientras que el de invierno lo hace cerca del perihelio, el punto de la órbita más cercano al Sol. Esto provoca veranos e inviernos templados. Debido a la precesión, los equinoccios y solsticios se van desplazando. Cuando el verano tiene lugar en el punto más cercano al Sol, y el invierno en el punto más alejado, las estaciones se extreman, dando lugar

a veranos tórridos e inviernos muy fríos. Ambas situaciones se alternan a intervalos de 11 000 años, aproximadamente.

Estos ciclos se dan también en otros planetas y lunas. En Marte, la oblicuidad es actualmente de 25°, similar por tanto a la de la Tierra. Pero, al estar más próximo de Júpiter, experimenta una mayor fuerza gravitacional, con lo que las variaciones de oblicuidad son mucho más exageradas, variando entre 15° y 25° en periodos de unos 100 000 años. Como en la Tierra, en periodos de oblicuidad pequeña es esperable que los casquetes polares acumulen más hielo (de CO₂ y agua). En Venus, por el contrario, la oblicuidad es muy pequeña (3°) pero, además, el clima del planeta viene fundamentalmente determinado por su densa atmósfera, que se encarga de distribuir el calor a lo largo de toda su superficie, con lo que los cambios en la oblicuidad deben afectar poco al clima del planeta. En Titán, la gran luna de Saturno, se ha estimado un ciclo de unos 60 000 años, que afectaría a la localización de sus lagos de metano.

¿QUÉ FUTURO LE ESPERA AL CLIMA TERRESTRE?

La Tierra ocupa una posición privilegiada en el sistema solar en la ya mencionada zona de habitabilidad, pero sabemos que no será así para siempre. El aumento de luminosidad solar ha ido alejando la zona de habitabilidad del Sol. Hace unos 4 000 Ma esta zona incluía la órbita de Venus pero, con el tiempo, Venus fue quedando fuera de la misma, con las consecuencias que ya conocemos para nuestro planeta vecino.

Inevitablemente, la Tierra quedará fuera de la zona de habitabilidad cuando el Sol abandone la llamada secuencia principal para convertirse en una gigante roja. Esto ocurrirá de aquí a unos 4 000 millones de años, tiempo más que suficiente como para que otros muchos mecanismos hayan podido alterar el clima y la vida en el planeta.

Aunque a lo largo de los últimos cientos de millones de años el aumento del brillo solar ha sido compensado por una mayor destrucción de CO₂ atmosférico, llegará un momento en que este mecanismo no sea suficiente para mantener la temperatura en

los valores actuales. Esto podría desencadenar un efecto invernadero descontrolado en la Tierra, alcanzando temperaturas abrasadoras y perdiendo eventualmente el agua líquida debido a la evaporación masiva de los océanos. De acuerdo con algunos modelos matemáticos, esto ocurrirá dentro de unos 500 millones de años. Incluso antes de alcanzar este escenario, la desaparición de buena parte del CO₂ de la atmósfera impedirá la fotosíntesis de la mayoría de las plantas y otros organismos, con consecuencias dramáticas para el resto de la biosfera.

Pero hay otros escenarios posibles. Como mencionamos, continuamente parte del CO₂ acumulado en el interior de la Tierra pasa a la atmósfera. A medida que el interior de la Tierra se vaya enfriando, la expulsión de CO₂ irá disminuyendo, mientras que su desaparición de la atmósfera continuaría. El efecto invernadero sería cada vez menor y la temperatura de la Tierra caería, hasta helar por completo el planeta. Entonces, entraría en un estado de glaciación total.

El que la Tierra termine transformándose en un horno, o en una gran bola de nieve, dependerá de cuál de los escenarios anteriores ocurra primero, lo cual es difícil de predecir. En cualquiera de los dos casos, estos cambios tendrán inevitables consecuencias sobre las diferentes formas de vida en nuestro planeta.

Ante tal perspectiva, algunos científicos piensan que el futuro de la humanidad estaría en otros objetos de nuestro sistema solar. El aumento de la luminosidad solar puede hacer que otros planetas y lunas más exteriores evolucionen hacia climas más benignos que los que poseen actualmente. Por ejemplo, la temperatura de Marte aumentará, aunque debido a su tenue atmósfera, difícilmente alcanzará condiciones de habitabilidad similares a la de la Tierra. Una cuestión interesante es qué les ocurrirá a las lunas que albergan agua líquida en su interior, como Europa o Encélado. ¿Se fundirán sus cortezas heladas, aflorando sus océanos interiores? ¿Podría estar en uno de estos pequeños y distantes mundos el futuro de la humanidad? Aunque hoy en día no disponemos de respuestas para estas cuestiones, los científicos esperan que estas nos lleguen gracias a las futuras misiones destinadas a explorar estos mundos lejanos.

LECTURAS RECOMENDADAS

- ALLEN, O.E. Y EL EQUIPO EDITORIAL DE TIME-LIFE BOOKS, *La atmósfera*, Barcelona, Planeta, 1991.
- ARRANZ GARCÍA, P. Y SOLÍS GARCÍA, J., *Cielos exóticos*, Madrid, Equipo Sirius, S.A., 1994.
- BRYSON, B., *Una breve historia de casi todo*, Barcelona, RBA, 2003.
- FRAZIER, K. Y EL EQUIPO EDITORIAL DE TIME-LIFE-BOOKS, *El Sistema Solar*, Barcelona, Planeta, 1991.
- INGERSOLL, A., *Planetary Climates*, Princeton University Press, 2013.
- , *Júpiter y Saturno*, *Investigación y Ciencia*, n.º 65, 1982.
- KELLY BEATTY J., COLLINS PETERSEN, C., CHAIKIN, A. (EDS.), *The New Solar System*, Sky Publishing Corp. y Cambridge University Press, 1999.
- KEPLER, E., *Sol, lunas y planetas*, Barcelona, Salvat, 1995.
- MÁROV, M., *Planetas del Sistema Solar*, Moscú, Editorial Mir, 1985.
- SAGAN, C., *Un punto azul pálido: Una visión del futuro humano en el espacio*, Planeta, Barcelona, 2006.
- TRIGO RODRÍGUEZ, J.M., *Las raíces cósmicas de la vida*, Barcelona, Universidad Autónoma de Barcelona, 2012.